

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Maja Grbavac

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Vedran Šimunović dipl. ing.

Student:

Maja Grbavac

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Vedranu Šimunoviću i doc. dr. sc. Gorani Baršić na pomoći tijekom pisanja rada.

Maja Grbavac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Maja Grbavac**

Mat. br.: 0035201023

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Prijedlog proširenja etalonske baze za umjeravanje elektroničko-mehaničkih uređaja s ticalom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Proposal of new calibration method for stylus instruments**

Opis zadatka:

Norma ISO 5436-1:2000 definira različite tipove etalona koje je potrebno koristiti pri umjeravanju elektroničko-mehaničkih uređaja s ticalom. Etalon dubine brazde služi za provjeru vertikalne komponente mjernog uređaja, dok se etaloni hrapavosti koriste za cjelokupnu provjeru mjernog uređaja, posebice mjernih algoritama. Zbog ograničenja postojećeg sustava osiguravanja sljedivosti rezultata u postupku umjeravanja elektroničko-mehaničkih uređaja s ticalom, nacionalni mjeriteljski instituti ulažu napore u razvoj nove metode umjeravanja uređaja u statičkim i dinamičkim mjerenjima, osobito za različite vrijednosti amplituda i valnih duljina, koje se ne mogu postići primjenom klasičnih etalona definiranih normom ISO 5436-1:2000. U okviru izrade završnog rada studentica će:

1. Opisati etalone koji se koriste za umjeravanje elektroničko-mehaničkih uređaja s ticalom prema normi ISO 5436-1:2000.
2. Navesti nedostatke i ograničenja postojeće etalonske baze prema recentnim zaključcima relevantnih mjeriteljskih instituta.
3. Dati prijedlog proširenja etalonske baze u području statičkog umjeravanja uređaja s ticalom.
4. Provesti umjeravanje elektroničko-mehaničkog uređaja s ticalom u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina korištenjem predložene mjerne metode i komentirati ostvarene rezultate.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.

3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.

2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.

3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Vedran Šimunović

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ:

POPIS SLIKA:	III
POPIS TABLICA:	V
POPIS OZNAKA:	VI
SAŽETAK	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD	1
2. HRAPAVOST I PARAMETRI HRAPAVOSTI	3
2.1. Hrapavost	3
2.2. Parametri hrapavosti	4
3. ELEKTRONIČKO-MEHANIČKI UREĐAJ S TICALOM	8
3.1. Uređaji s ticalom	8
5.2. Perthometer S8P	10
4. ETALONI ZA UMJERAVANJE UREĐAJA S TICALOM	12
4.1. Etaloni prema normi ISO 5436-1:2000	12
4.2. Tip A – etalon dubine brazde	12
4.3. Tip B - etalon provjere stanja igle ticala	13
4.4. Tip C – etalon valovitosti	16
4.5. Tip D – etalon hrapavosti	17
4.6. Tip E – etalon profila koordinata	19
4.7. Tip F – Softver	19
5. NEDOSTATCI I OGRANIČENJA POSTOJEĆE ETALONSKE BAZE	20
6. PRIJEDLOG PROŠIRENJA ETALONSKE BAZE	21
6.1. Opća konfiguracija	21
6.2. Piezo pretvornik	24
7. PROVEDBA UMJERAVANJA	28
7.1. Dinamički način rada	28
7.2. Profil trokutaste geometrije	30
7.2.1. Trokutasti profil $R_z = 0,4 \mu m$	30
7.2.2. Trokutasti profil $R_z = 4 \mu m$	34
7.2.3. Trokutasti profil $R_z = 40 \mu m$	35
7.3. Pravokutni profil	40
7.3.1. Pravokutni profil $R_z = 0,4 \mu m$	40
7.3.2. Pravokutni profil $R_z = 4 \mu m$	43
7.3.3. Pravokutni profil $R_z = 40 \mu m$	44

7.4. Statički način rada	47
8. ZAKLJUČAK.....	53
IZVORI:	54

POPIS SLIKA:

Slika 1. Komponente profila	3
Slika 2. Prijenosne karakteristike profila hrapavosti	4
Slika 3. Prikaz amplitudnih parametara hrapavosti	5
Slika 4. Prikaz uzdužnog parametra hrapavosti RSm.....	6
Slika 5. Abbott – Firestonova krivulja	7
Slika 6. Konstrukcija uređaja s ticalom	9
Slika 7. Prikaz vanjskog vođenja	10
Slika 8. Prikaz vođenja s nožicom.....	10
Slika 9. Perhometer S8P	11
Slika 10. Tip A – etalon dubine brazde	13
Slika 11. Etalon tipa A2	13
Slika 12. Vrh ticala	14
Slika 13. Tip B2	15
Slika 14. Postupak provjere stanja vrha ticala pomoću žileta	16
Slika 15. Tip C1.....	16
Slika 16. Tip C2.....	17
Slika 17. Tip C3.....	17
Slika 18. Tip C4.....	17
Slika 19. Tip D1	18
Slika 20. Tip D2	18
Slika 21. Tip E2 – precizna prizma	19
Slika 22. Prikaz pomaka igle ticala i pieza.....	21
Slika 23. Shema umjeravanja piezo pretvornika pomaka.....	22
Slika 24. Karakterizacija površine wafera.....	23
Slika 25. Rezultat mjerenja hrapavosti površine wafera	23
Slika 26. Princip rada piezo elementa	24
Slika 27. Kontroler (pojačalo)	25
Slika 28. Piezo element	26
Slika 29. PZTControl	27
Slika 30. WaveEditor – PZTControl	27
Slika 31. Prikaz ticala pomoću kojeg se provodilo umjeravanje.....	28
Slika 32. Podjela visine profila na 40 točaka	30
Slika 33. Izgled WaveTable-a prilikom generiranja trokutastog profila	32
Slika 34. Prikaz simuliranog profila nazivne vrijednosti $R_z = 0,4 \mu\text{m}$	33

Slika 35. Prikaz simuliranog profila nazivne vrijednosti $R_z = 4 \mu\text{m}$	35
Slika 36. Prikaz simuliranog profila nazivne vrijednosti $R_z = 40 \mu\text{m}$	36
Slika 37. Odstupanja od referentnih vrijednosti parametara hrapavosti R_a i R_z kod trokutnih profila.	38
Slika 38. Nagib na simuliranom profilu	39
Slika 39. Raspodjela visine po točkama kod pravokutnog profila	40
Slika 40. Generirani pravokutni profil u WaveEditoru	41
Slika 41. Izgled simuliranog pravokutnog profila $R_z = 0,4 \mu\text{m}$	42
Slika 42. Prikaz simuliranog pravokutnog profila $R_z = 4 \mu\text{m}$	44
Slika 43. Prikaz pravokutnog simuliranog profila $R_z = 40 \mu\text{m}$	45
Slika 44. Odstupanja od referentnih vrijednosti parametara R_a i R_z kod pravokutnih profila.....	47
Slika 46. Način unošenja pomaka pri umjeravanju vertikalne komponente	48
Slika 47. Odstupanja od referentnih vrijednosti parametra P_t kod simuliranih profila	50
Slika 49. Simulirani profil $P_t = 5 \mu\text{m}$	50
Slika 50. Simulirani profil $P_t = 10 \mu\text{m}$	51
Slika 51. Simulirani profil $P_t = 25 \mu\text{m}$	51
Slika 52. Simulirani profil $P_t = 50 \mu\text{m}$	51

POPIS TABLICA:

Tablica 1. Osnovni podaci o uređaju Perthometer S8P	11
Tablica 2. Etaloni prema normi ISO 5436-1:2000	12
Tablica 3. Preporučene referentne duljine i duljine vrednovanja	29
Tablica 4. Podatci vezani za profil $R_z = 0,4 \mu\text{m}$	31
Tablica 5. Rezultati mjerenja profila $R_z = 0,4 \mu\text{m}$	32
Tablica 6. Podatci vezani za profil $R_z = 4 \mu\text{m}$	34
Tablica 7. Rezultati mjerenja profila $R_z = 4 \mu\text{m}$	34
Tablica 8. Podatci vezani za profil $R_z = 40 \mu\text{m}$	35
Tablica 9. Rezultati mjerenja profila $R_z = 40 \mu\text{m}$	36
Tablica 10. Vrijednosti parametra R_z profila trokutne geometrije.....	37
Tablica 11. Vrijednosti parametra R_a profila trokutne geometrije.....	37
Tablica 12 Vrijednosti parametra R_{Sm} za simulirani profil $R_z = 40 \mu\text{m}$	39
Tablica 13. Podaci vezani za pravokutni profil $R_z = 0,4 \mu\text{m}$	41
Tablica 14. Rezultati mjerenja pravokutnog profila $R_z = 0,4 \mu\text{m}$	42
Tablica 15. Podatci vezani za pravokutni profil $R_z = 4 \mu\text{m}$	43
Tablica 16. Rezultati mjerenja pravokutnog profila $R_z = 4 \mu\text{m}$	43
Tablica 17. Podatci vezani za pravokutni profil $R_z = 40 \mu\text{m}$	44
Tablica 18. Rezultati mjerenja pravokutnog profila $R_z = 40 \mu\text{m}$	45
Tablica 19. Vrijednosti parametra R_z profila pravokutne geometrije	46
Tablica 20. Vrijednosti parametra R_a profila pravokutne geometrije	46
Tablica 21. Rezultat umjeravanja vertikalne komponente	49
Tablica 22. Vrijednosti parametra P_t	49
Tablica 23. Relativna odstupanja od referentnih parametara hrapavosti kod simuliranih profila	52

POPIS OZNAKA:

l_r	mm	duljina ispitivanja
l_t	mm	duljina vrednovanja
l_r	mm	referentna duljina
R_z	μm	najveća visina profila
R_a	μm	srednje aritmetičko odstupanje ordinate $Z(x)$
RS_m	μm	srednji korak elementa profila
d	μm	dubina brazde
P_t	μm	ukupna visina profila
λ_s	mm	sjecište između hrapavosti i kraćih valnih duljina
λ_c	mm	sjecište između hrapavosti i valovitosti
λ_f	mm	sjecište između valovitosti i duljih valnih duljina
v_T	mm/s	brzina kojom se ticalo kreće tokom mjerenja
f	1/s	frekvencija pomaka piezo elementa
N		broj točaka
n		broj perioda strukture
\bar{x}	μm	aritmetička sredina dobivenih vrijednosti
s	nm	procijenjeno standardno odstupanje
Δ	μm	odstupanje izmjerene vrijednosti od referentne vrijednosti
δ		relativno odstupanje izmjerene vrijednosti od referentne vrijednosti

SAŽETAK

U radu je pojašnjen pojam hrapavosti površina te su opisani 2D parametri hrapavosti, a detaljnije oni koji su se umjeravali u eksperimentalnom dijelu rada. Nakon toga opisani su mjerni elektroničko-mehanički uređaji s ticalom; njihova opća konfiguracija te načini vođenja ticala. Navedene su i greške koje se mogu javiti prilikom mjerenja pomoću uređaja s ticalom. Posebno je opisan mjerni uređaj Perthometer S8P na kojem su se provodila mjerenja.

Opisani su etaloni koji se koriste za umjeravanje elektroničko-mehaničkog uređaja s ticalom, a propisani su normom ISO 5436-1:2000 *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method; Measurement standards - Part 1: Material measures*. Uz svaku vrstu etalona navedeno je za umjeravanje kojih parametara se koristi.

Također su opisani neki od nedostataka trenutno korištenih etalona te način na koji ti nedostaci utječu na umjeravanje mjernog područja uređaja s ticalom. Objašnjeni su pojmovi statički i dinamički način rada mjernog uređaja s ticalom.

Iznesen je prijedlog mogućnosti proširenja etalonske baze pomoću piezo elementa. Opisan je piezo element, njegov način rada te upravljanje njegovim pomacima pomoću softvera. Također je opisana opća konfiguracija uređaja i piezo elementa te njihova međusobna interakcija koja rezultira simuliranim profilima.

U posljednjem poglavlju objašnjen je način na koji se provodilo umjeravanje pomoću piezo elementa. Poglavlje je podijeljeno na dvije cjeline; dinamički način rada i statički način rada. U dinamičkom načinu rada mjerili su se simulirani profili pravokutne i trokutne geometrije, dok se u statičkom modu mjerila dubina simuliranog profila. Navedeni su parametri koji su bili potrebni za simulaciju profila i za podešavanje mjernog uređaja. Prema definiranim parametrima provedena su mjerenja te su komentirani ostvareni rezultati.

Ključne riječi: hrapavost, etalon, norma, elektroničko-mehanički uređaj s ticalom, statički način rada, dinamički način rada, piezo element, simulirani profil, proširenje etalonske baze

SUMMARY

The paper firstly explains the term surface roughness and describes 2D parameters of roughness, especially those that were calibrated in the experimental part of the project. After that, the measuring stylus devices are described; their general configuration and the ways to guide the probe. Mistakes that may occur when measuring with stylus device are listed. A Perthometer S8P measuring device was especially described because it was used for measurements in the experimental part of the project.

The standards used for calibration of the stylus device are described. They are defined by the norm ISO 5436-1:2000 *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method; Measurement standards - Part 1: Material measures*. Every standard has its own application for calibration of different roughness parameters.

There are also described some of the shortcomings of currently used standards and how these disadvantages affect the calibration of the measuring range of the device. The concepts of static and dynamic mode of operation of the measuring device are explained.

A proposition for the possibility of extending the standard base by using the piezo element is presented. The piezo element, its mode of operation and its movement control, which is provided by the software, are described. There is also a description of general configuration of the device and the piezo element and their mutual interaction which results in simulated profiles.

The last chapter explains how calibration is performed by using a piezo element. The chapter is divided into two parts; dynamic mode and static mode. In the dynamic mode, simulated profiles of rectangular and triangular geometry were measured, while in the static mode the depth of the simulated profile was measured. Parameters which were used to simulate the profile and to adjust the measuring device are listed. Measurements were performed according to the defined parameters and the obtained results were commented.

Keywords: roughness, roughness standard, norm, stylus device, static mode, dynamic mode, piezo element, simulated profile, extension of roughness standard base

1. UVOD

Iako se fino obrađene površine na prvi pogled mogu činiti savršeno ravne i glatke, tek se mjerenjem površine otkriva njihova prava tekstura i kompleksnost koji su posljedica obrade i same kristalne strukture materijala. Tekstura površine je vrlo važna jer utječe na svojstva i kvalitetu površine. Stoga ukoliko se hrapavost površine može izmjeriti i odrediti, može se dati povratna informacija koja će ukazati na nedostatke i optimizirati postupke obrade. Mnogi strojni dijelovi i njihov rad uvelike ovisi o hrapavosti površine (npr. osovine i ležajevi). Ukoliko površina nije obrađena na primjeren način, doći će do većeg trošenja te će se tako smanjiti životni vijek strojnog dijela. Uz trošenje i trenje, hrapavost može utjecati i na otpornost na koroziju, dinamičku čvrstoću strojnog elementa, prenošenje topline i dr.

Postoje mnogobrojni uređaji pomoću kojih se određuje hrapavost površine, no najčešće korišteni su elektroničko-mehanički uređaji s ticalom (eng. *stylus instruments*). Elementi uređaja s ticalom te njihova međuovisnost definirani su normom ISO 3274:1996 *Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Nominal characteristics of contact (stylus) instruments*. Tipičan uređaj s ticalom mjeri hrapavost tako da je s ticalom, odnosno iglom ticala, u fizičkom kontaktu s mjerenom površinom dok pretvornik pretvara vertikalne pomake ticala u električne signale koje potom šalje u računalo gdje se ti signali dalje obrađuju. Igla ticala koja je u fizičkom kontaktu s mjernom površinom uobičajeno je izrađena od dijamanta.

Norma ISO 5436-1:2000 *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method; Measurement standards - Part 1: Material measures* definira različite tipove etalona koje je potrebno koristiti pri umjeravanju elektroničko-mehaničkih uređaja s ticalom.

Svaki etalon za umjeravanje ima ograničeno područje primjene prema svojim karakteristikama koje su usko vezane uz konstrukciju i mjerne karakteristike uređaja s ticalom.

Najčešće korišteni etaloni za umjeravanje elektroničko-mehaničkih uređaja s ticalom su: etalon dubine brazde koji služi za provjeru vertikalne komponente mjernog uređaja, te etaloni hrapavosti koji se koriste za cjelokupnu provjeru mjernog uređaja, posebice mjernih algoritama.

Provedba mjerenja parametara hrapavosti korištenjem uređaja s ticalom obavlja se u dinamičkom modu, gdje se ili predmet mjerenja ili igla ticala pomiče kontinuiranom brzinom. Vertikalni otklon igle ticala se potom u odgovarajućim pretvaračem pretvara u električni signal koji se dalje šalje na računalnu obradu.

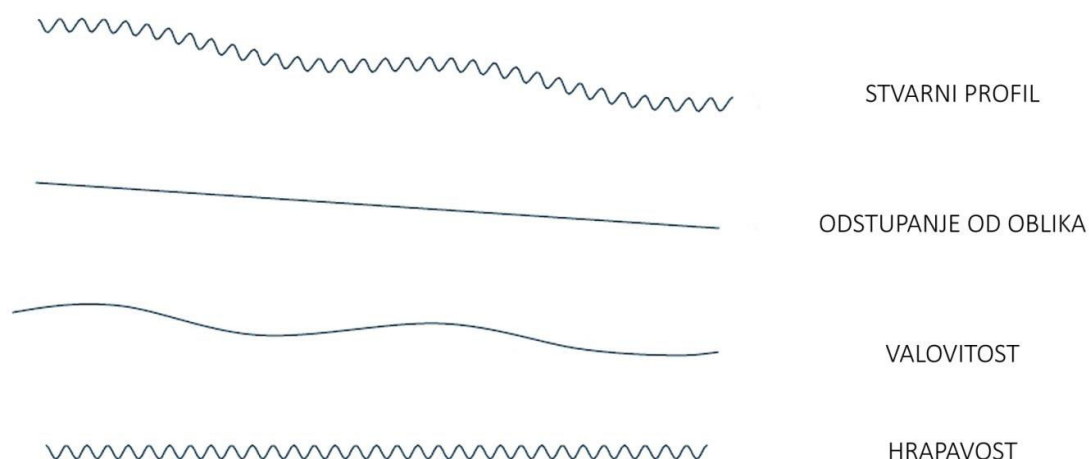
Međutim, umjeravanje mjernog uređaja korištenjem etalona dubine brazde odvija se u statičkom režimu. Nadalje, pri umjeravanju mjernog uređaja korištenjem lateralnog etalona (Tip C) i etalona hrapavosti (Tip D) laboratoriji, u pravilu, raspolažu sa svega nekoliko artefakata različitih nazivnih vrijednosti što ima rezultira nedostatnim vrijednostima različitih amplituda i valnih duljina.

Zbog istaknutih nedostataka u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina razvijena je metoda umjeravanja elektroničko-mehaničkih uređaja s ticalom gdje se umjesto etalona koristi piezo element.

2. HRAPAVOST I PARAMETRI HRAPAVOSTI

2.1. Hrapavost

Da bi se moglo govoriti o etalonima hrapavosti, najprije treba objasniti pojam hrapavosti. Hrapavost se može definirati kao dio teksture površine. Tekstura površine odnosi se na fine nepravilnosti površine, odnosno na bregove i dolove koji su dobiveni na površini putem postupka oblikovanja. Dakle, tekstura površine se sastoji od dvije komponente već spomenute hrapavosti, i valovitosti. Hrapavost se dodaje na komponentu valovitosti. Također postoje i odstupanja od oblika, no ona su nešto dužih valnih duljina od hrapavosti i valovitosti.

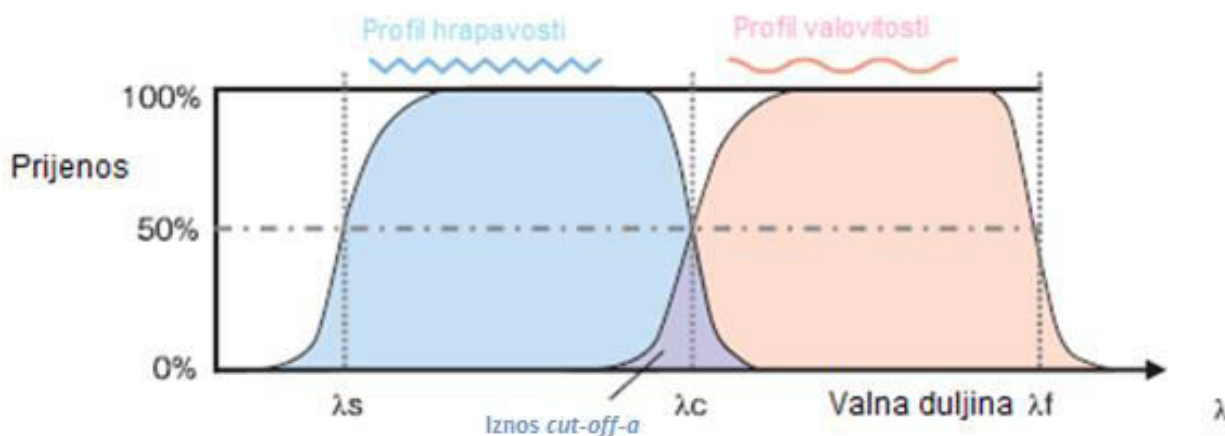


Slika 1. Komponente profila [1]

Hrapavost površine je rezultat postupaka obrade te je svojstvena određenoj tehnologiji, a ne stroju. Ona ne uključuje valovitost, odstupanje od oblika te površinske greške. Hrapavost je kvantificirana odstupanjima u smjeru vektora normale realne površine u odnosu na idealnu površinu. Hrapavost karakteriziraju visoke frekvencije, kratkih valnih duljina. Filtracijom profila površine, tj. određivanjem koje će se valne duljine propuštati, moguće je izdvojiti hrapavost od valovitosti i odstupanja od oblika. To znači da se propuštanjem kratkih valnih duljina može izdvojiti hrapavost. Prema normi ISO 3274:1996 *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Nominal characteristics of contact (stylus) instruments* jedina dozvoljena filtracija profila jest korištenjem Gaussovog filtra.

Pojam *cut-off* javlja se kod filtriranja profila površine. On predstavlja granične vrijednosti električnog filtra (λ_s , λ_f , λ_c) te numerički određuje graničnu frekvenciju ispod ili iznad koje su komponente izdvojene ili eliminirane.

Duljina ispitivanja l_t , duljina vrednovanja l_n i referentna duljina l_r su karakteristične duljine ispitivanja. Iznos granične vrijednosti filtra λ_c jednaka je vrijednosti referentne duljine. [1]



Slika 2. Prijenosne karakteristike profila hrapavosti [2]

Filter λ_s definira granicu između valne duljine hrapavosti površine i kraćih valnih duljina koje su prvenstveno posljedica „šuma“ mjernog uređaja.

Filter λ_c definira granicu valnih duljina hrapavosti i valovitosti dok λ_f predstavlja granicu valne duljine valovitosti i komponenti većih valnih duljina.

2.2. Parametri hrapavosti

Svi parametri profila površine se računaju i određuju u ovisnosti o vrsti profila. Profili se dijele na tri vrste te uz svaku vrstu dolazi određen prefiks. Vrste su:

- Hrapavost uz koji dolazi prefiks **R**
- Primarni profil; **P**
- Valovitost; **W**

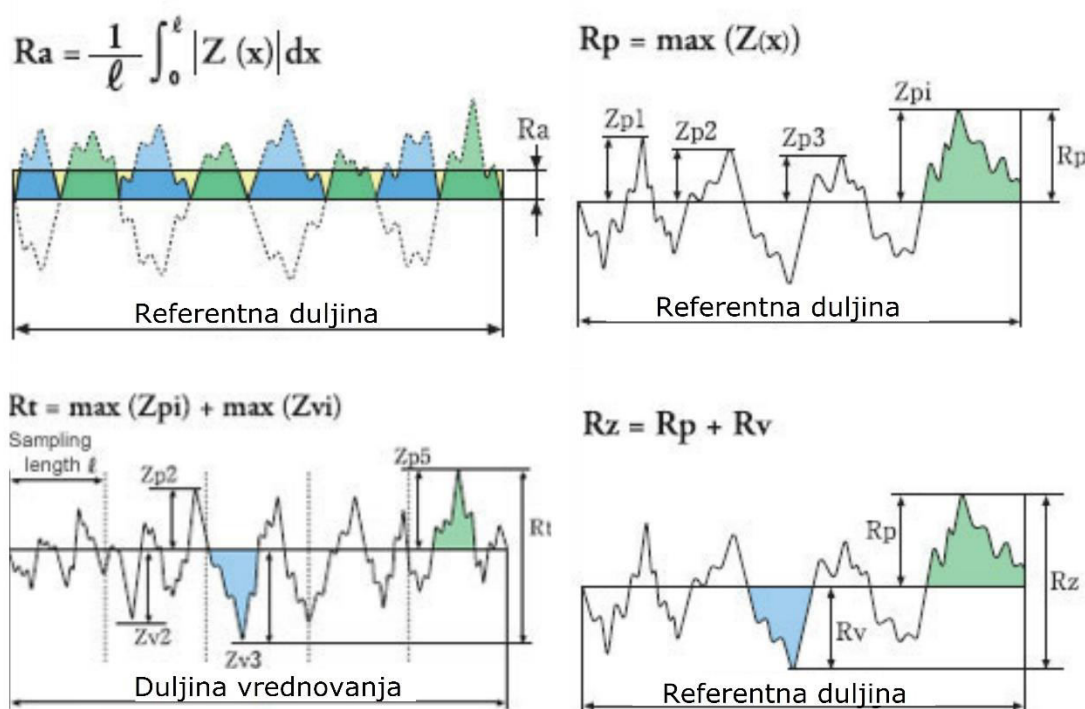
Parametri hrapavosti profila površine za 2D mjerni sustav se mogu podijeliti u iduće skupine:

- Uzdužni parametri – opisuju varijacije uzduž profila
- Amplitudni parametri – opisuju varijacije po visini profila

- Hibridni parametri – opisuju varijacije iu kombinacije uzdužnih i amplitudnih karakteristika profila
- Krivuljni i srodni parametri - opisuju varijacije na krivuljama dobivene iz uzdužnih i amplitudnih karakteristika profila.

Danas je mnogo parametara u upotrebi, no jedan od najčešćih je amplitudni parametar **Ra**. On predstavlja predstavlja aritmetičku sredinu apsolutnih odstupanja profila hrapavosti od srednje linije. Ostali amplitudni parametri su:

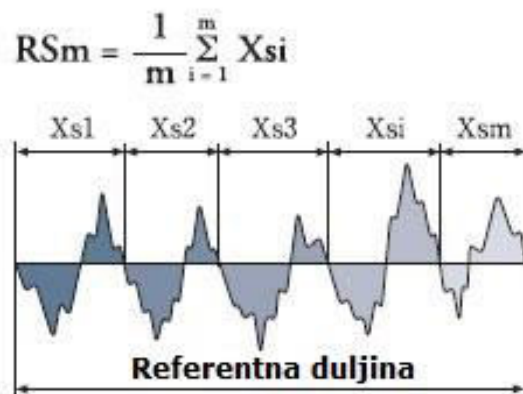
- **Rp** – najveća visina vrha profila na referentnoj dužini
- **Rv** – najveća dubina dola po referentnoj dužini
- **Rz** – najveća visina profila unutar referentne dužine (**Rp** + **Rv**)
- **Rt** – ukupna visina profila (suma visine najvećeg vrha profila i dubine najnižeg dola profila unutar duljine ocjenjivanja).



Slika 3. Prikaz amplitudnih parametara hrapavosti [3]

Uzdužni parametri mogu se podijeliti na:

- **RSm** – srednji korak elementa profila
- **HSC** – (high spot count) broj lokalnih vrhova profila unutar dužine vrednovanja.

Slika 4. Prikaz uzdužnog parametra hrapavosti RSm [3]

Hibridni je parametar samo jedan i naziva se srednji kvadratni nagib profila odnosno $R\Delta q$.

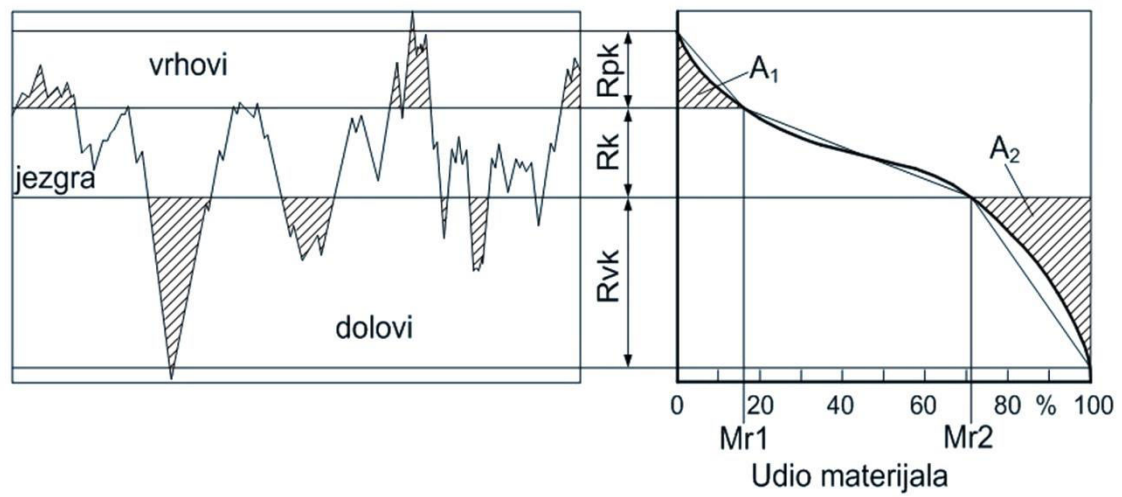
$$R\Delta q = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} (\theta(x) - \bar{\theta})^2 dx}, \quad \bar{\theta} = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} \theta(x) dx, \quad \text{gdje je } \theta \text{ nagib profila u danoj točki.}$$

Krivuljni i srodni parametri posebni su po tome što se temelje na krivulji udjela materijala profila, odnosno na Abbott – Firestone krivulji. Koriste se za karakterizaciju tribološki slojevitih površina. Krivuljni i srodni parametri koriste se onda kada je teško samo sa amplitudnim parametrom (npr. Ra) zadovoljavajuće prikazati površinu. Uzrok nemogućnost prikaza amplitudnim parametrima je slojevitost površine koja nastaje uslijed redosljeda operacija obrade (gruba obrada nakon koje slijedi fina obrada kojom se uklanjaju grubi vrhovi). Dolovi u tom slučaju ostaju netaknuti. Gornja površina dobivena brušenjem te netaknuti dolovi u analizi se promatraju odvojeno.

Parametri hrapavosti za krivulju udjela materijala mogu se podijeliti na:

- **Rpk** – reducirana visina vrha profila, dio profila koji će u tijeku eksploatacije biti prvi istrošen
- **Rk** – dubina jezgre hrapavosti profila, dio profila s povećanom nosivosti koja preuzima osnovna opterećenja i bitno utječe na karakteristike i životni vijek površine
- **Rvk** – reducirana dubina dolova profila, dio profila koji ima sposobnost zadržavanja ulja u dubokim žljebova koji su stvoreni pri strojnoj obradi površine
- **MrI** – relativni udio materijala u vrhovima

- **Mr2** – relativni udio ulja u dolovima
- **A1** – površina materijala vrhova profila
- **A2** – površina maziva dolova profila. [1]



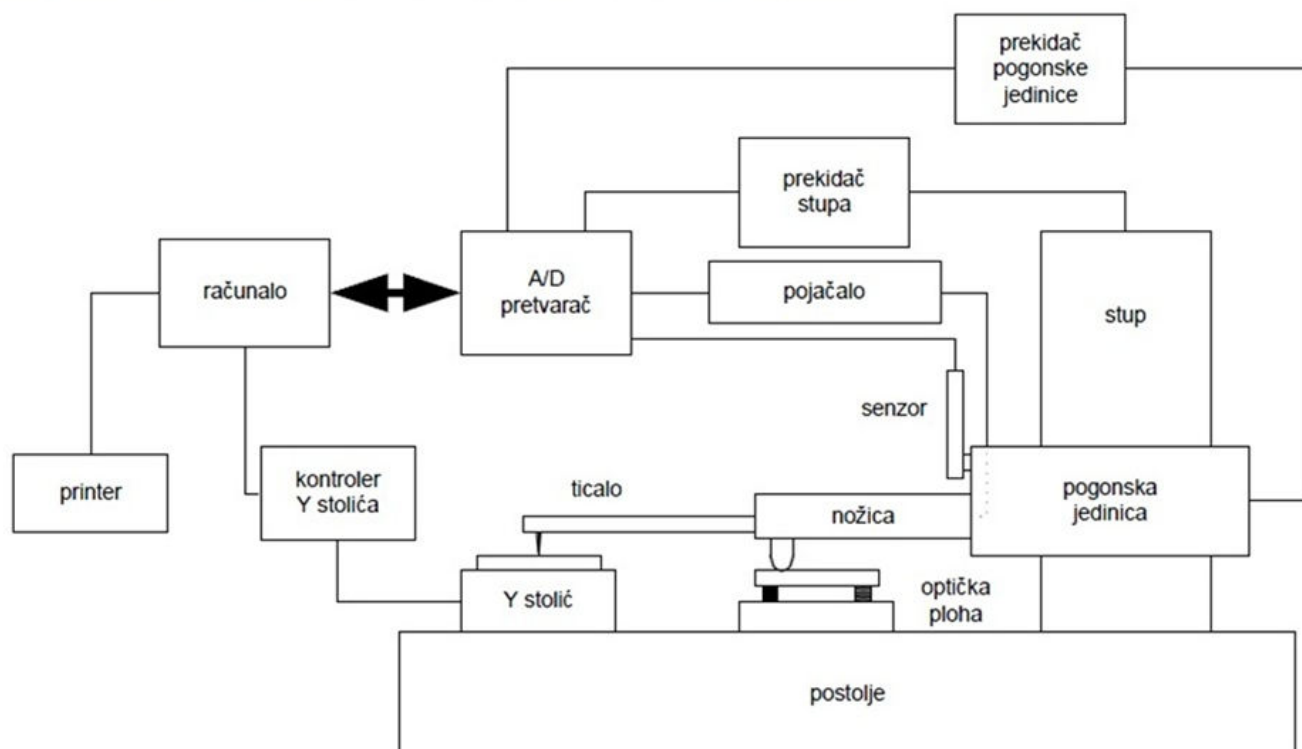
Slika 5. Abbott – Firestonova krivulja [1]

3. ELEKTRONIČKO-MEHANIČKI UREĐAJ S TICALOM

3.1. Uređaji s ticalom

Razlikujemo 2D i 3D uređaje s ticalom. Kod 2D uređaja, ticalo prelazi preko mjerne površine u jednom smjeru, te bilježi 2D profil površine, dok je kod 3D uređaja potrebna još jedna dimenzija koja se može dobiti pomoću metode rasterskog i metode radijalnog snimanja.

Normom ISO 3274: 1996 *Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Nominal characteristics of contact (stylus) instruments* definirani su dijelovi uređaja sa ticalom te su definirani odnosi među tim dijelovima. Elektroničko-mehanički uređaj s ticalom se sastoji od ticala koje je u fizičkom kontaktu sa površinom mjerenog uzorka. Svi vertikalni pomaci se pomoću pretvornika pretvaraju u električni signal koji se kasnije transformira u dijagram iz kojeg se može vidjeti stanje površine te se mogu iščitati traženi parametri. Najčešći pretvornici su induktivni pretvornik, piezoelektrični pretvornik i optički pretvornik. Ostali dijelovi uređaja su pick-up, odnosno konzola, na kojoj se nalazi ticalo. On je pokretan u smjeru x-osi pomoću motora (step, linearni motor) te sadrži mjenjač brzine. *Pick-up* povlači ticalo po površini mjerenog uzorka konstantnom brzinom (dinamički način mjerenja). Zatim slijedi elektroničko pojačalo koje povećava signal koji pretvornik generira iz vertikalnog pomaka ticala. Signali se zatim šalju u računalo koje automatizirano prikuplja podatke. Računalo je ujedno i upravljačka jedinica pomoću koje se kontrolira i prati proces. Također mora postojati i referentna površina za relativno vođenje ticala u obliku nožice ili ravnine. [4]



Slika 6. Konstrukcija uređaja s ticalom [5]

Dio uređaja koji je u kontaktu sa površinom najčešće je napravljen od dijamanta ili safira te je vrh pažljivo oblikovan u piramidalnom ili stožastom obliku. S obzirom na oblik vrha ticala (veličina radijusa r), ekstremni dolovi na mjerenoj površini često ostanu ne zabilježeni. Očekivano, neki će parametri biti pod većim utjecajem oblika vrha nego ostali. Posebnu pozornost također treba obratiti i na mjerne sile ticala tijekom mjerenja. Sila koja je prevelika može uzrokovati oštećenje površine uzorka.

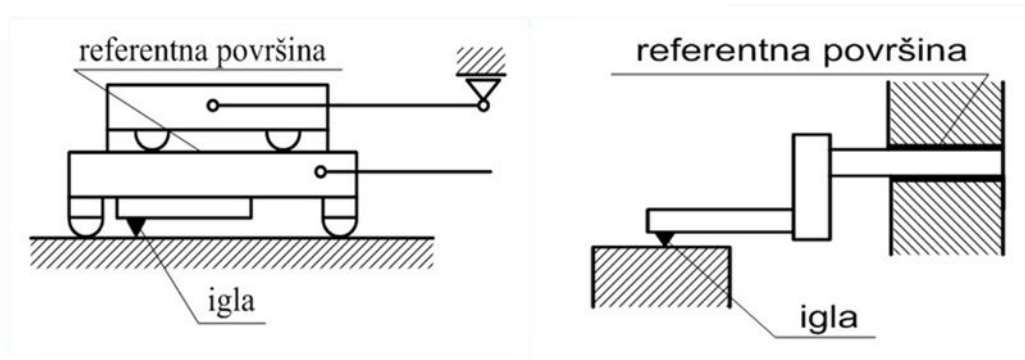
Postoje tri vrste pogrešaka koje se mogu javiti tijekom mjerenja uređajem s ticalom. To su:

- greške zbog radijusa vrha ticala
- greške zbog izvedbe referentne površine
- greške zbog pogrešno odabrane cut-off vrijednosti.

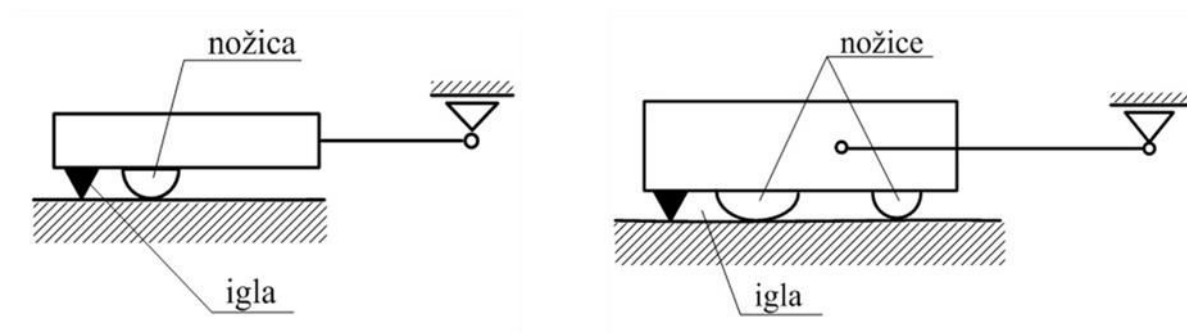
Prema ISO 3274: 1996 idealan oblik vrha ticala bi bio stožac sa zaobljenim vrhom. Nazivne dimenzije su:

- radijus vrha: 2 μm , 5 μm ili 10 μm
- kut: 60°, 90° (ako nije specificirano, primjenjuje se 60°).

Pogreške također mogu proizaći i iz načina vođenja. Dvije su vrste vođenja: vanjsko vođenje i vođenje s nožicom. [5]



Slika 7. Prikaz vanjskog vođenja [5]



Slika 8. Prikaz vođenja s nožicom [5]

5.2. Perthometer S8P

Uređaj na kojem će se provoditi mjerenje za potrebe eksperimentalnog dijela ovog rada je uređaj s ticalom Perthometer S8P. Koristi kontaktnu metodu mjerenja te je namijenjen mjerenju 2D parametara hrapavosti. Perthometer S8P uređaj je koji se umjerava prema vodiču DKD-R 4-2 *Calibration of measuring instruments and standards for roughness measuring technique*. U Tablici 1. navedeni su osnovni podatci o uređaju te njegovu načinu rada. [5]



Slika 9. Perthometer S8P [5]

Tablica 1. Osnovni podaci o uređaju Perthometer S8P [5]

Proizvođač	Feinprüf Perthen GmbH, Njemačka
Tragovi	Od 4 do 128 sa 8064 točaka po tragu
Duljina očitavanja [mm]	0,56; 1,75; 5,6; 17,5; 56,0
Standardni mjerni putovi [mm]	0,4; 1,25; 4,0; 12,5; 40
Cut-off (granične valne dužine) [mm]	0,025; 0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8,0
Mjerni opseg [μm]	$\pm 12,5\mu\text{m}$, $\pm 62,5\mu\text{m}$, $\pm 125\mu\text{m}$, $\pm 625\mu\text{m}$, $\pm 2500\mu\text{m}$
Profili	D – direktni G – ispravljeni P – ispravljen bez početnog i završnog dijela W – valovitost R – hrapavost
Tip filtera	Gaussov filter, RC filter, osni filteri (cut-off kod 75% i 50%)

4. ETALONI ZA UMJERAVANJE UREĐAJA S TICALOM

4.1. Etaloni prema normi ISO 5436-1:2000

Umjeravanje širokog raspona instrumenata za mjerenje hrapavosti zahtjeva više tipova etalona. Prema normi ISO 5436-1:2000 razlikuje se pet tipova etalona. Svaki etalon, s obzirom na njegove karakteristike, posjeduje određeni raspon uporabe. Materijal od kojeg su izrađeni etaloni, prema normi, mora biti dovoljno tvrd da bi se osigurao zadovoljavajuće dug uporabni vijek etalona u odnosu na cijenu izrade i umjeravanja istog. U Tablici 2 navedene su vrste etalona prema normi ISO 5436-1:2000.

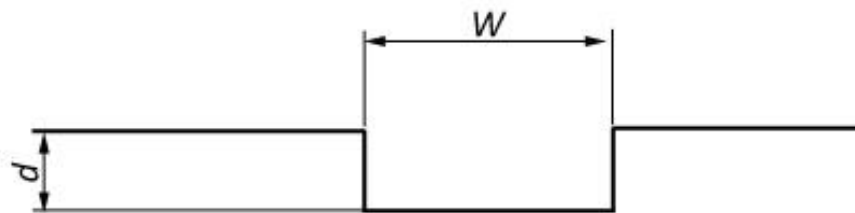
Tablica 2. Etaloni prema normi ISO 5436-1:2000

Tip etalona	Naziv etalona
A	Etalon dubine brazde
B	Etalon provjere stanja igle ticala
C	Etalon valovitosti
D	Etalon hrapavosti
E	Etalon profila koordinata

Etalon je mjera, mjerilo, referentna tvar ili mjerni sustav namijenjen za određivanje, ostvarivanje, čuvanje ili obnavljanje jedinice jedne ili više vrijednosti kakve veličine kako bi mogli poslužiti kao referenca. Dakle, da bi se mogla osigurati mjerna sljedivost potrebno je umjeravati uređaje etalonima.

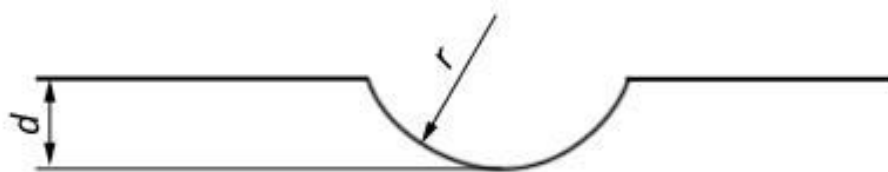
4.2. Tip A – etalon dubine brazde

Tip A1, odnosno etalon dubine brazde, koristi se za provjeru i podešavanje vertikalne komponente uređaja. Širina brazde označena je sa W dok se dubina označava sa d . Takvi etaloni imaju široke brazde sa ravnim dnom jednake ili drugačije širine. Može biti više brazdi na jednom etalonu te su tada odvojene. Svaka brazda je dovoljno široka da bude neosjetljiva na oblik ili stanje igle ticala. [6]



Slika 10 . Tip A – etalon dubine brazde [4]

Također postoji i etalon tipa A2 koji za razliku od etalona A1 ima zaobljeno dno dovoljno velikog radijusa koji onemogućava utjecaj oblika i stanja igle ticala. Radijus je označen sa r dok je dubina označena sa d .

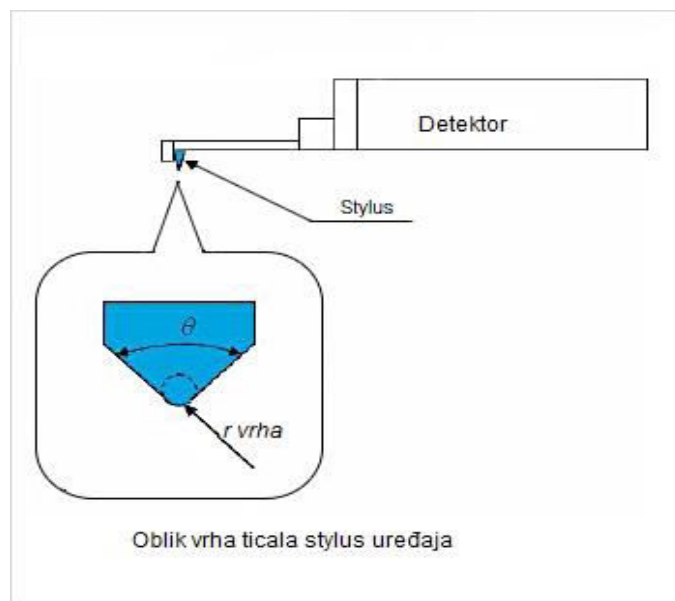


Slika 11. Etalon tipa A2 [4]

4.3. Tip B - etalon provjere stanja igle ticala

Etalon provjere stanja igle ticala ili tip B koriste se za umjeravanje stanja vrha ticala. Prema normi razlikuju se tip B1, B2 i B3.

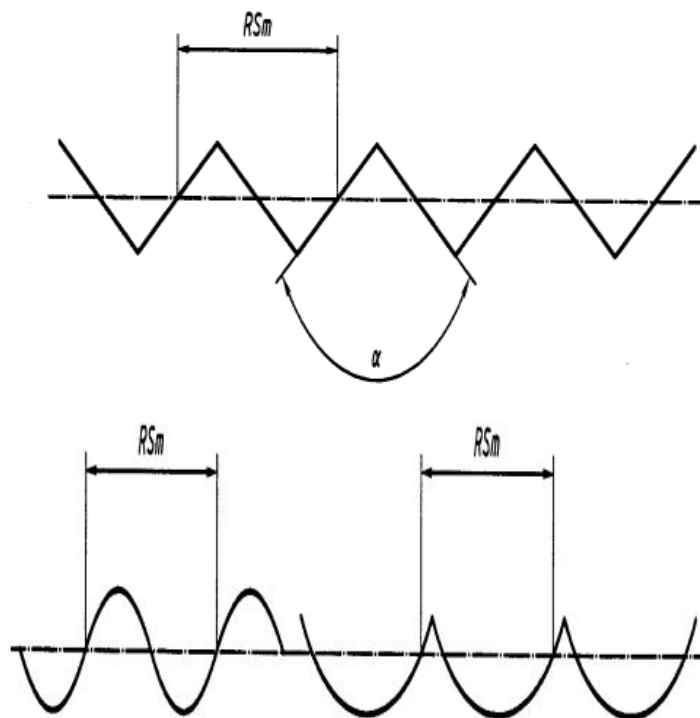
Tip B1 ima usku brazdu ili više odvojenih brazdi proporcioniranih tako da sa svakom raste osjetljivost na dimenzije igle ticala. Uže brazde imaju zaobljeno dno onolikog radijusa koji omogućuje da budu osjetljive na oblik i stanje vrha ticala.



Slika 12. Vrh ticala [2]

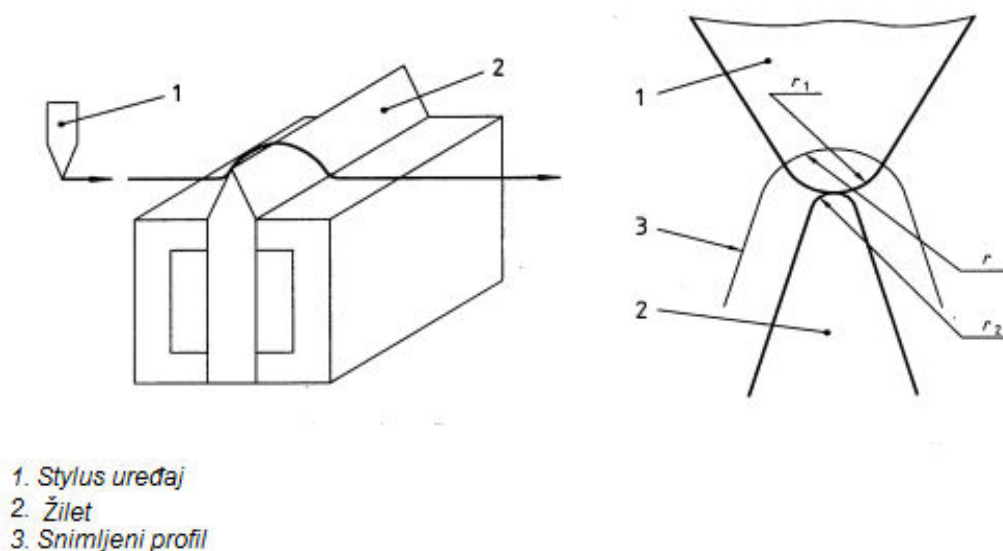
Etaloni tipa B2 imaju dvije ili više brazdi jednake nazivne vrijednosti Ra . Usporedbom izmjerene vrijednosti Ra na svakoj od brazdi može se uočiti kakvo je stanje igle ticala. Potrebno je napraviti više prijelaza, najmanje osamnaest, te ona moraju biti ravnomjerno raspoređena po etalonu.

Brazde koje su osjetljive na veličinu vrha ticala su trokutastog presjeka te imaju oštre vrhove i doline, dok će neosjetljive biti sinusoidnog ili polukružnog oblika te će se tako osigurati neovisnost Ra o obliku vrha ticala.



Slika 13. Tip B2 [2]

Tip B3 ima fine ispupčene bridove. Oštrica žileta ima otprilike slične bridove kao etalon tipa B3 (otprilike $0.1 \mu\text{m}$ ili manje) te može uspješno zamijeniti etalon pri provjeri stanja vrha ticala stylus uređaja. Kut vrha i radijus vrha etalona moraju biti manji od kuta vrha i radijusa uređaja koji se provjerava. [6]

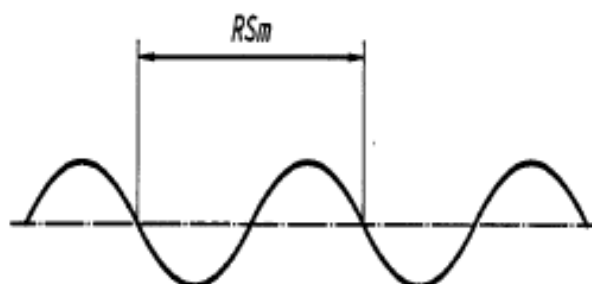


Slika 14. Postupak provjere stanja vrha ticala pomoću žileta [4]

4.4. Tip C – etalon valovitosti

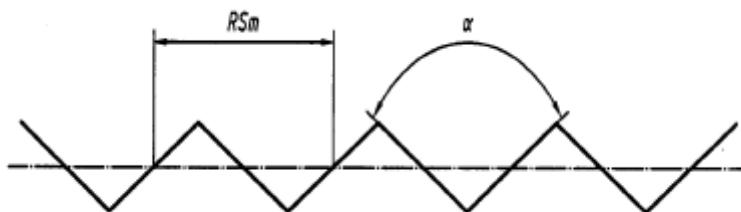
Ovaj tip etalona se uglavnom koristi za umjeravanje vertikalnih komponenti profila. Također se može koristiti i za umjeravanje horizontalnih komponenti profila pod pretpostavkom da je udaljenost između brazdi unutar prihvatljivih granica. Takvi etaloni imaju ponavljajuće brazde različitih oblika.

Postoje četiri vrste etalona tipa C. Tip C1 ima brazde oblika poput profila sinusnog vala i karakterizirane su pomoću parametara RS_m i Ra . [6]



Slika 15. Tip C1 [4]

Tip C2 ima brazde oblika jednakokračnih trokuta. Takvi profili karakterizirani su parametrima RS_m , Ra i kutom α .



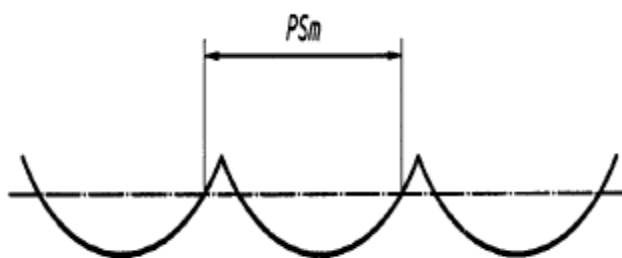
Slika 16. Tip C2 [4]

Tip C3 približno simulira sinusoidne brazde, odnosno sadrži trokutne profile koji imaju obao ili okrnjen vrh.



Slika 17. Tip C3 [4]

Tip C4 sadrži brazde lučnog oblika i karakteriziran je sa parametrima PS_m i Pa . [6]

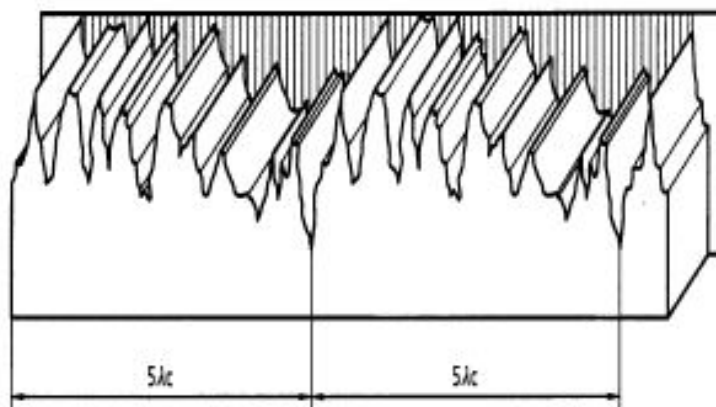


Slika 18. Tip C4 [4]

4.5. Tip D – etalon hrapavosti

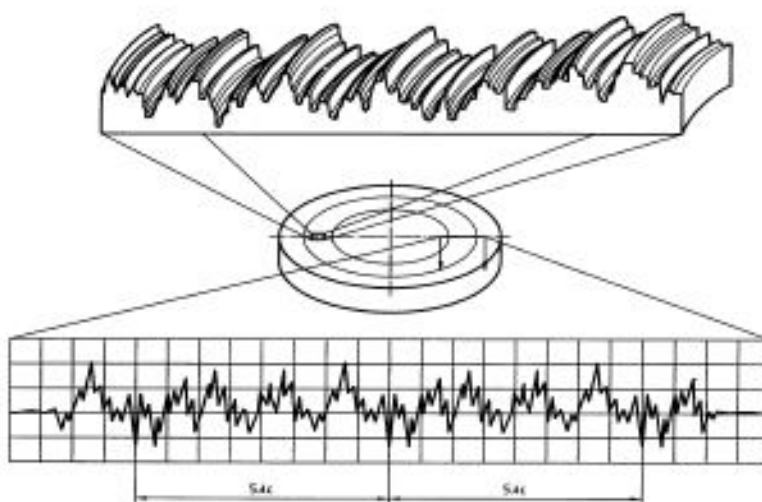
Etalon tipa D je često korišten etalon i služi za cjelokupno umjeravanje instrumenata. Razlikuju se dvije podvrste etalona D; tip D1 i tip D2.

Etalon tipa D1 sadrži iregularne profile vidljive u poprečnom presjeku (slično presjeku tla) koji se ponavljaju u longitudinalnom smjeru unutar pet duljina uzorkovanja ($5\lambda_c$). Oni simuliraju izradke vrlo širokog graničnog raspona i raznolikog profila brazdi. Etalon je određen parametrima R_a i R_z .



Slika 19. Tip D1 [4]

Tip etalona D2 karakteriziran također je karakteriziran parametrima R_a i R_z . Sadrži iregularne profile koji se ponavljaju svakih $5\lambda_c$ u radialnom smjeru. [6]



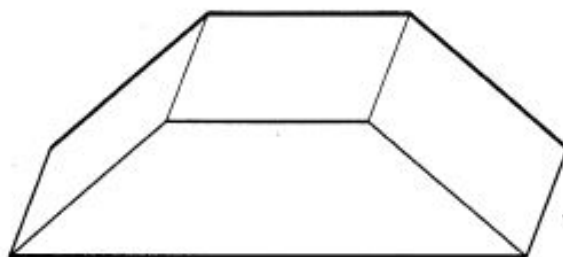
Slika 20. Tip D2 [4]

4.6. Tip E – etalon profila koordinata

Etalon tipa E može se podijeliti na dvije vrste; preciznu kuglu ili polukuglu i preciznu prizmu. Etalon tipa E1 odnosno precizna kugla ili polukugla karakterizirana je vlastitim radijusom i parametrom Pt . Radijus kugle ili polukugle mora biti takav da dozvoli da vrh ticala ostane u kontaktu s površinom te da se ne dogodi greška prilikom prelaska s jedne strane kugle, odnosno njene najviše točke, simetrično na drugu stranu najviše točke.

Tip E2, odnosno precizna prizma, karakterizirana je kutovima između svojih površina i parametrom Pt na svakoj od površina.

Oblik i veličina etalona trebaju biti takvi da osiguraju da ticalo uređaja ostane u kontaktu sa površinom te da ne dođe do greške prilikom putovanja ticala. Putanja bi trebala biti oblikovana tako da se dobije simetričan prijelaz preko profila. Duljina gornje površine bi trebala biti dovoljno dugačka da bi se etalon mogao izravnati na stabilan način. [6]



Slika 21. Tip E2 – precizna prizma [4]

4.7. Tip F – Softver

U drugom dijelu norme ISO 5436:2000 opisana je uporaba referentnog software-a i referentnog skupa podataka u cilju ostvarivanja boljeg umjeravanja pomoću etalona za umjeravanje uređaja s ticalom. [6]

5. NEDOSTATCI I OGRANIČENJA POSTOJEĆE ETALONSKE BAZE

Postoje dva glavna načina pomoću kojih uređaj s ticalom provodi mjerenja. Pomoću statičkog načina umjerava se vertikalna komponenta mjernog uređaja, odnosno za umjeravanje se koristi se etalon dubine brazde. U statičkom načinu otklonjeni su određeni utjecaji koji postoje kod dinamičkog načina rada (utjecaj brzine, frekvencije).

Provedba mjerenja parametara hrapavosti korištenjem uređaja s ticalom obavlja se u dinamičkom modu, gdje se predmet mjerenja ili igla ticala pomiče kontinuiranom brzinom. Vertikalni otklon igle ticala se potom u odgovarajućim pretvaračem pretvara u električni signal koji se dalje šalje na računalnu obradu.

Za oba načina rada postoje mnogobrojne izvedbe etalona. Etaloni se razlikuju po veličinama svojih parametara te po valnim duljinama i amplitudama. Najčešće korišteni etaloni su lateralni etalon (Tip C) te etalon hrapavosti (Tip D).

Lateralni etalon karakteriziran je pomoću parametara RS_m i R_a , dok su to kod etalona hrapavosti R_a i R_z .

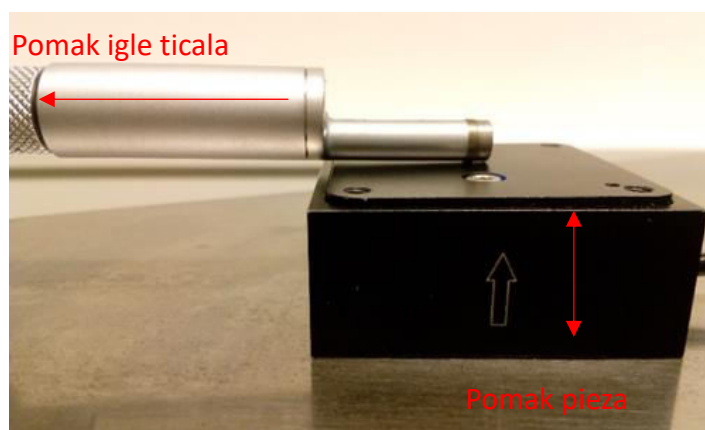
S obzirom da laboratoriji u pravilu raspolažu sa svega nekoliko različitih etalona koji imaju određenu vrijednost amplitude i valne duljine, a isto tako i određenu vrijednost već navedenih parametara, to može dovesti do nedostatka artefakata kojim bi se moglo umjeriti čitavo mjerno područje uređaja.

Uzevši u obzir navedene nedostatke, javlja se potreba za izradom i razvojem novih etalona pomoću kojih će se šire umjeriti mjerno područje uređaja. To dovodi do dodatnih troškova s obzirom da fizička realizacija etalona hrapavosti uključuje vrlo precizne postupke obrade i postupke prevlačenja da bi se osigurale odgovarajuće mjeriteljske značajke tih etalona.

6. PRIJEDLOG PROŠIRENJA ETALONSKE BAZE

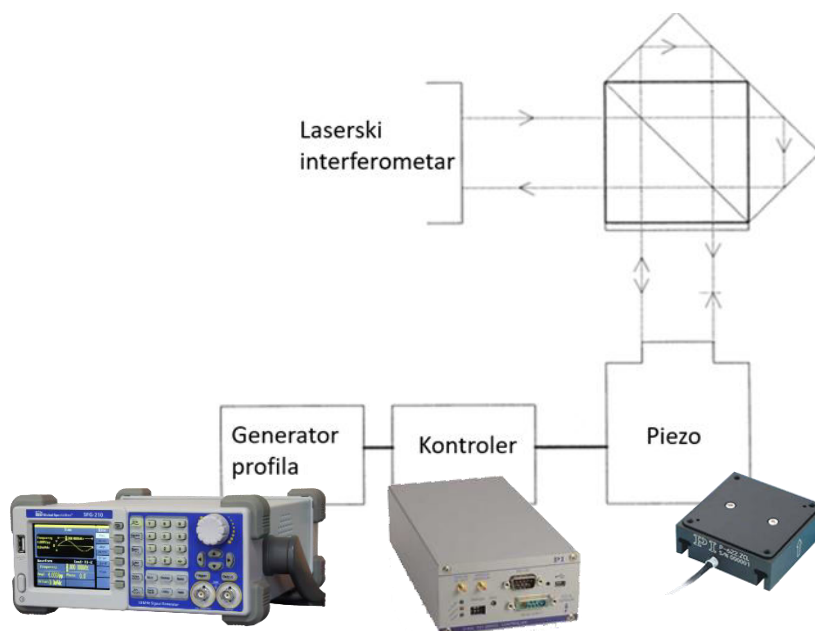
6.1. Opća konfiguracija

Potencijalan prijedlog proširenja etalonske baze postigao bi se pomoću interakcije piezo pretvornika i uređaja s ticalom. Piezo se postavlja na stolić koji je fiksiran. Ticalo se dovodi u kontakt sa piezo elementom, odnosno sa *waferom*. Na piezo je postavljen *wafer*, pločica koja ima vrlo ravnu površinu. *Wafer* je izrađen od monokristala silicija te je njegova površina prirodno zaštićena silicijevim dioksidom. Frekvencije pomaka piezo elementa u smjeru z-osi, usklađene su prema brzini pomaka igle ticala. Igla ticala se kreće konstantom brzinom po površini *wafera*. Takvi pomaci rezultiraju simuliranim profilom koji se potom generira pomoću dobivenih signala, odnosno iz pomaka ticala.



Slika 22. Prikaz pomaka igle ticala i pieza

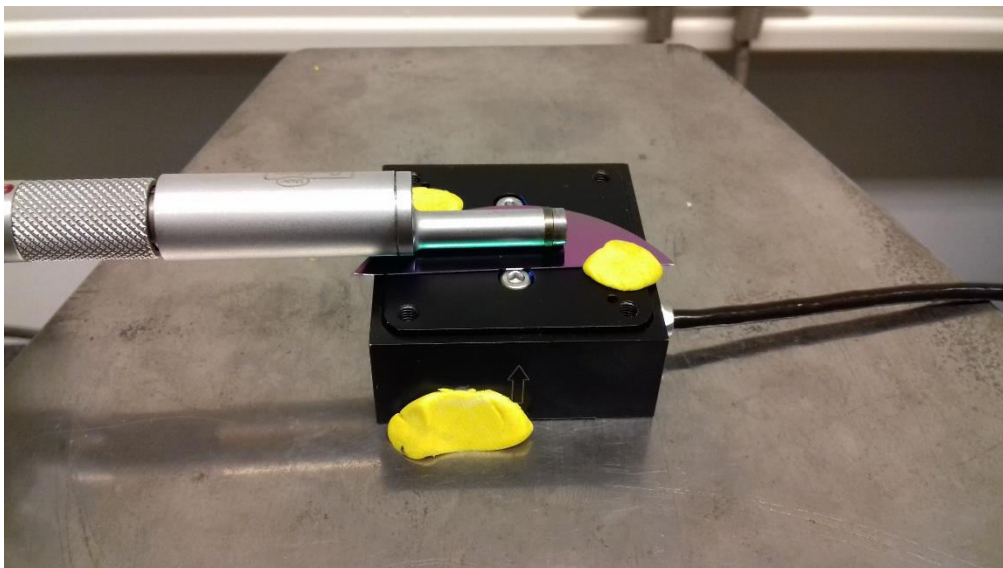
Prije samog korištenja pieza, on treba biti umjeren tako da bi se mogla postići sljedivost dobivenih rezultata mjerenja parametara hrapavosti. Umjeravanje piezo elementa provodi se pomoću laserskog interferometra kojim raspolaže Laboratorij za precizna mjerenja dužina. Umjeravaju se pomaci piezo elementa u smjeru z-osi, odnosno oni pomaci koji će se koristiti pri simulaciji profila hrapavosti.



Slika 23. Shema umjeravanja piezo pretvornika pomaka

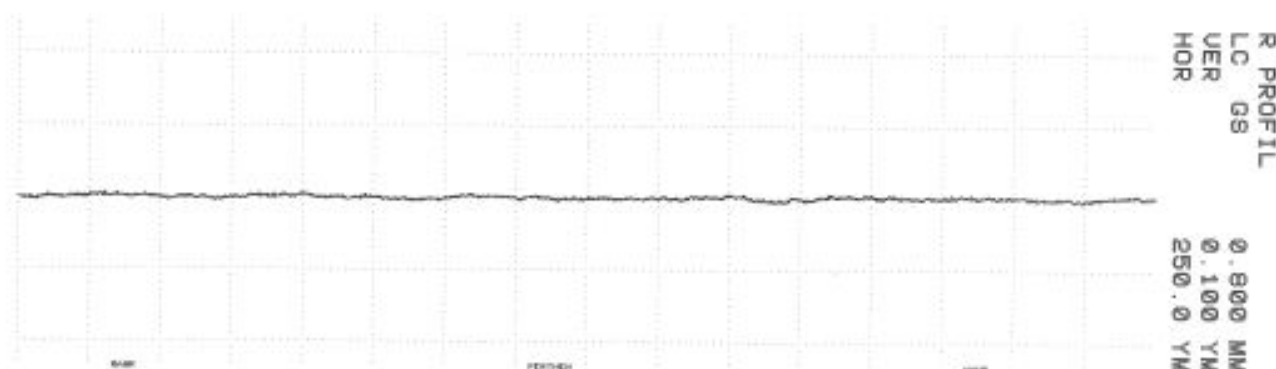
S umjerenim piezom (shema postupka umjeravanja na Slici 23.) moguće je postići umjeravanje uređaja s ticalom u dinamičkom i statičkom načinu rada uz vrlo širok raspon amplituda i valnih duljina.

Uređaj s ticalom na kojem se provodi mjerenja je Perthometer S8P te je opisan u poglavlju 5.2. Najprije se na uređaj postavlja ticalo koje ima vođenje pomoću nožice. Radijus zakrivljenosti vrha ticala je $r = 2 \mu\text{m}$. Ono se kasnije ne koristi pri mjerenjima, već se koristi samo za potrebe karakterizacije površine *wafra*. Na donjoj slici prikazano je ticalo s vođenjem s nožicom te piezo na kojem se nalazi pločica *wafra*.



Slika 24. Karakterizacija površine wafera

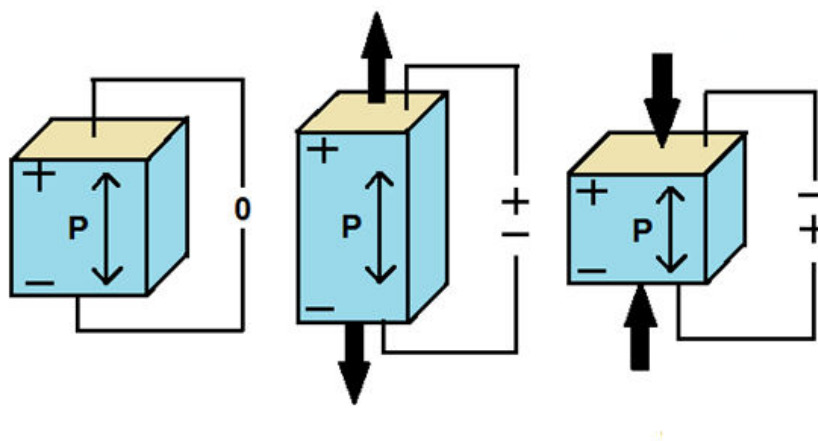
Potrebno je utvrditi stanje hrapavosti površine *wafera* tako da bi se vidjelo postoje li oštećenja ili nepravilnosti na površini koja bi kasnije mogla utjecati na dobivene rezultate mjerenja. Stanje hrapavosti utvrđuje se u dinamičkom načinu rada te se ticalo konstantnom brzinom kreće po površini *wafera* i uzima podatke. Tijekom snimanja profila površine *wafera* piezo miruje, dakle ne pravi nikakve pomake u smjeru z – osi. Pri mjerenju koristio se *cut-off* λ_c iznosa 0,8 mm. Mjerenjem je utvrđeno da na površini ne postoje nikakva značajna oštećenja i odstupanja što se može vidjeti na Slici 25.



Slika 25. Rezultat mjerenja hrapavosti površine wafera

6.2. Piezo pretvornik

Da bi se moglo govoriti o umjeravanju uređaja s ticalom pomoću piezo elementa, treba reći nešto više načinu rada pieza. Piezo element bi trebao omogućiti vrlo precizne pomake u smjeru osi z. Takvi fini pomaci postižu se pomoću dovođenja željenog napona do piezo elementa. Proporcionalno zadanom iznosu napona, povećavat će se ili smanjivati i pomak piezo elementa. Piezo element izrađen je od piezo električnih materijala (razni kristali i keramike) koji se uslijed promjena u naponu skupljaju ili šire. Ukoliko je polarizacija tih kristala npr. pozitivna, prilikom dovođenja pozitivnog napona on će se širiti dok će se dovođenjem negativnog skupljati (Slika 26). [10]



Slika 26. Princip rada piezo elementa [10]

Konkretno, u ovom radu su se koristili pojačalo, odnosno kontroler, te precizni piezo element proizvođača PI – Physik Instrumente. Pojačalo je priključeno na računalo s integriranim softverom pomoću kojeg se mogu programirati željeni pomaci koje potom kontroler pretvara u volte proporcionalne željenom pomaku te taj iznos napona šalje do piezo elementa.

Puni naziv pojačala je **E-625.CR LVPZT**. Njegova prosječna izlazna snaga iznosi 6 W. Maksimalni izlazni napon pojačala kreće se od -20 V do +120 V, kako bi se omogućilo upravljanje i niskonaponskim piezo elementima. Preporučeni naponi pri kojima bi piezo element trebao raditi iznose od -10 V do 100 V te se na taj način on može bolje očuvati i isto tako produžiti vrijeme njegova korištenja. Pojačalo E-625 može se koristiti i kod statičkih i kod dinamičkih primjena.

Visoka stabilnost izlaznog napona te malen utjecaj šumova na sam uređaj omogućuje vrlo precizno mikropozicioniranje. Osnovne operacije takvog uređaja uključuju prenošenje naredbe korisnika upravljačkog računala na koje je uređaj priključen do piezo elementa. Na upravljačkom računalu mora postojati softver koji omogućuje unošenje željenog pomaka, koji potom putuje od računala do kontrolera. Kontroler tu naredbu pretvara u volte te prenosi do piezo elementa koji potom provodi traženi pomak. Naredba se može dostaviti ili preko računala ili analogno. Nadalje može se dobiti ili ciljanja pozicija korištenjem opcije *Servo-on* (zatvorena petlja) ili ciljani napon korištenjem opcije *Servo-off* (otvorena petlja). Kod dinamičkog načina rada uređaja s ticalom koristio se *Servo-on*. [7]



Slika 27. Kontroler (pojačalo) [7]

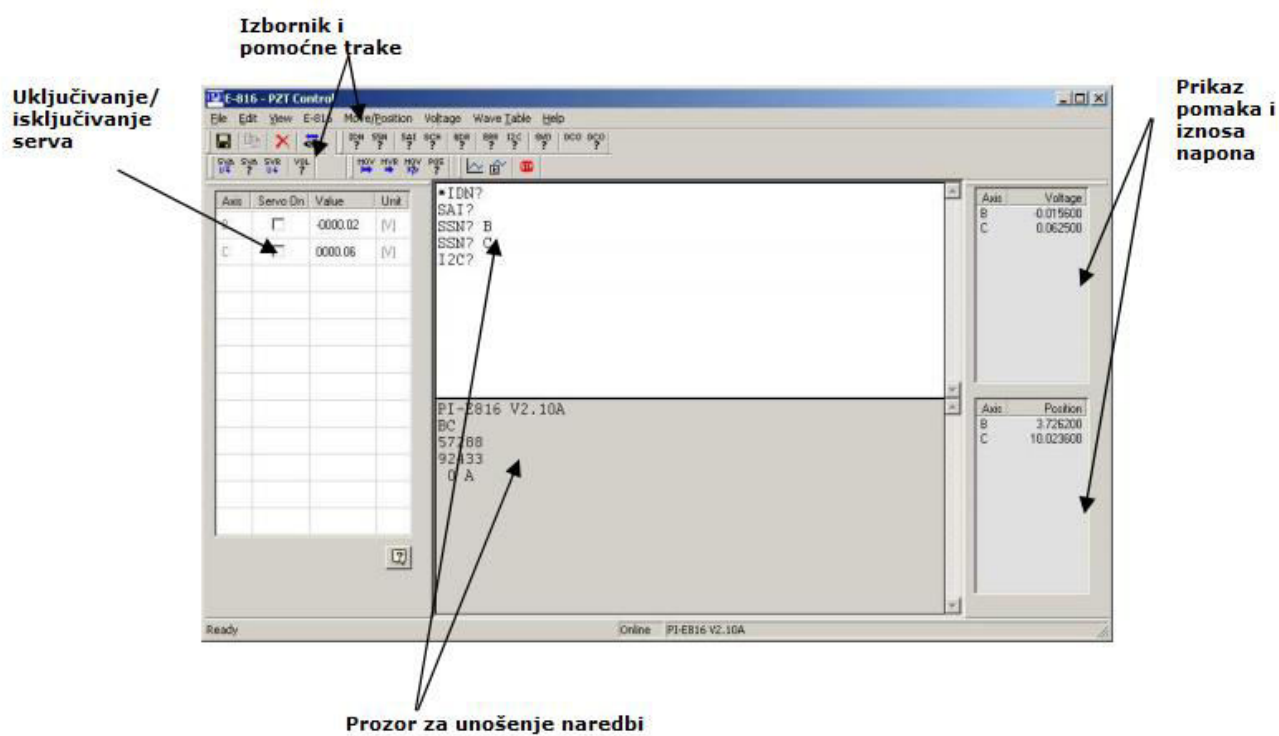
Naziv korištenog preciznog piezo elementa je **P-621.ZCD**. Aktivna os u smjeru koje vrši pomake je os z. Materijal od kojeg je izrađen je aluminij. Temperature na kojima može raditi se kreću od -20°C do 80°C . Njegova masa iznosi 0,17 kg. Prilikom korištenja otvorene petlje, može se pomicati po z-osi do 140 μm (napon od -20 V do 120 V) dok mu je kod zatvorene petlje mjerno područje definirano do 100 μm . Njegova rezolucija, prema podacima proizvođača, iznosi 0,1 nm uz deklariranu pogreška pri pozicioniranju od 0,02 %. Uloga pretvornika je da prenosi pomak generiran pomoću softvera do piezo elementa te se piezo element pomiče sukladno poslanoj naredbi, odnosno poslanom naponu. [8]



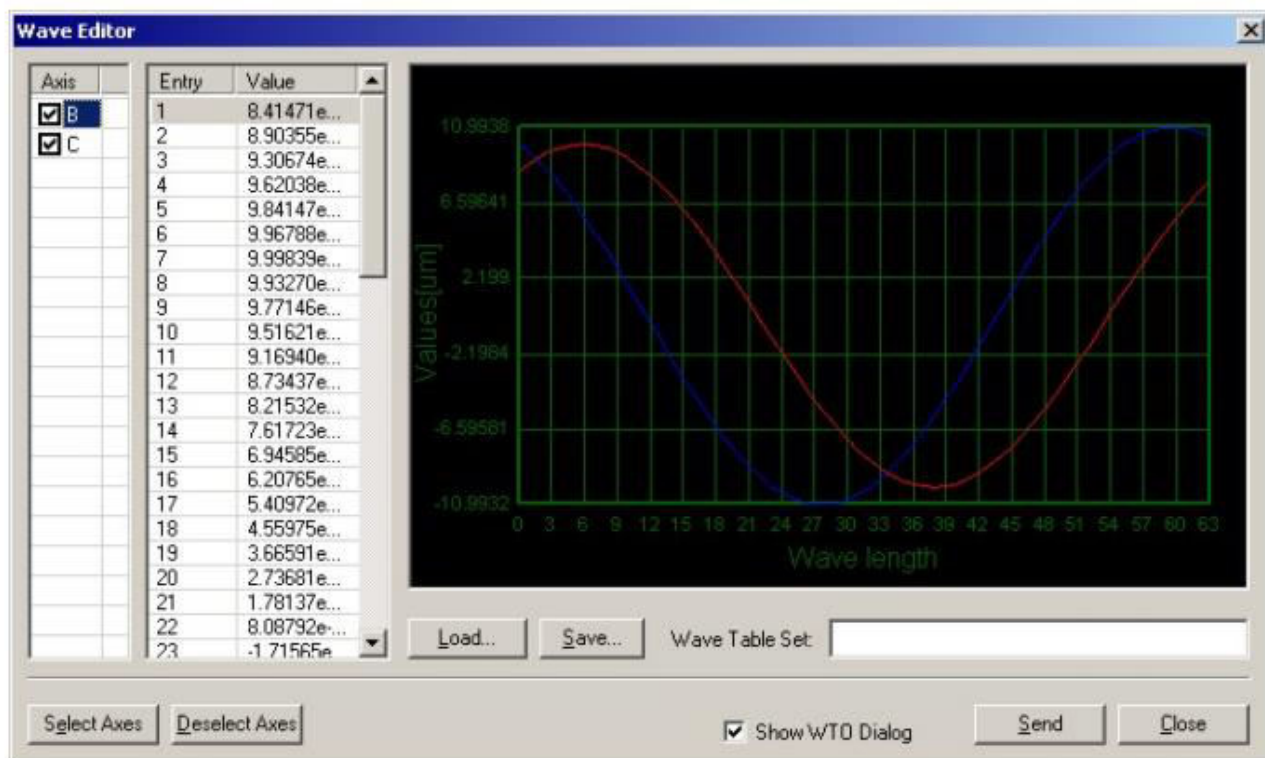
Slika 28. Piezo element [8]

Softver koji se koristi za upravljanje kontrolerom i piezo elementom je **PZTControl**. To je 32-bitni Windows program koji je razvijen za kontrolu jednog ili više umreženih kontrolera. Njegove osnovne funkcije su mogućnost unošenja informacija i naredbi o poziciji piezo elementa ili o korištenom naponu. Pomoću njega se omogućuje pristup svim naredbama vezanim za kontroler i piezo element. Alatne trake omogućuju lakše i jednostavnije snalaženje u programu. Neke od dodatnih funkcija softvera su: istovremeno upravljanje s više osi, uključivanje/isključivanje servo načina rada, prikaz statusa sustava, prikaz napona i položaja u stvarnom vremenu, konfiguriranje parametara.

Za potrebe provedbe ovog rada koristila se opcija **Wave Editor**. Pomoću te opcije može se načiniti tablica iz koje se generira jedna perioda. Perioda se može definirati s najviše 64 točke. U nastavku slijede prikazi sučelja softvera **PZTControl**. [9]



Slika 29. PZTControl [9]



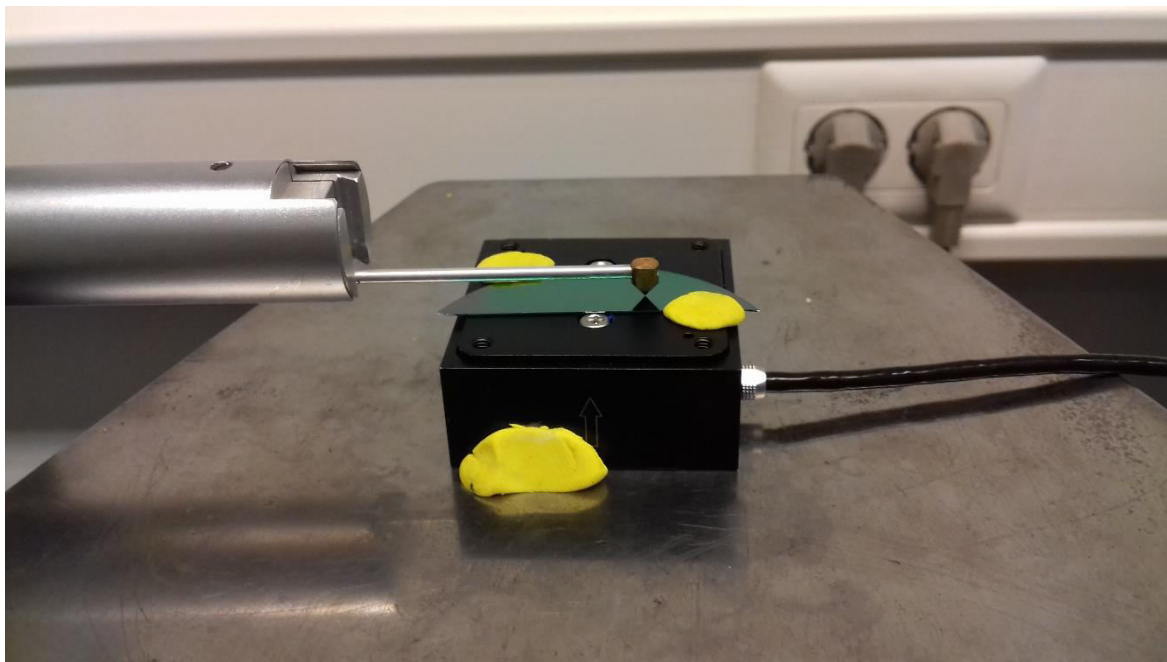
Slika 30. WaveEditor – PZTControl [9]

7. PROVEDBA UMJERAVANJA

7.1. Dinamički način rada

Kod dinamičkog načina rada ticalo ili predmet mjerenja se kreću konstantom brzinom po mjernoj površini predmeta te ticalo simultano prikuplja podatke vezane uz tu površinu. U ovom radu ticalo se kretalo konstantnom brzinom dok je predmet mjerenja, odnosno piezo element, oscilirao prema poslanim naredbama iz računala. U dinamičkom načinu rada provodilo se umjeravanje više komponenti uređaja kao što su: filtracija, računalna jedinica uređaja, lateralni (uzdužni pomak) te vertikalni pomak.

Ticalo koje se koristilo prilikom umjeravanja uređaja za potrebe izrade ovog rada imalo je vanjsko vođenje, odnosno nije se koristilo se ticalo s vođenjem s nožicom koje se koristilo prilikom mjerenja površine *wafers* dok je piezo element mirovao. U radu opisan sustav ne podržava mogućnost mjerenja korištenjem igle ticala uz vođenje u vidu nožice, jer pri pomaku piezo elementa pomiče se nožica dok igla ticala ne može registrirati zadani vertikalni pomak piezo elementa. Korišteno ticalo u postupku umjeravanja uređaja Perthometer S8P je ticalo s vanjskim vođenjem radijusa zakrivljenosti $r = 10 \mu\text{m}$.



Slika 31. Prikaz ticala pomoću kojeg se provodilo umjeravanje

Nakon što se je utvrđeno stanje hrapavosti površine *wafera*, umjeren piezo element te postavljeno odgovarajuće ticalo, bilo je potrebno definirati referentne duljine i duljine vrednovanja, odnosno *cut-off* vrijednosti koji će se koristiti pri umjeravanju. One se određuju prema zahtjevima norme ISO 4288:1996 *Geometric Product Specification (GPS) — Surface texture: profile method — Rules and procedures for the assessment of surface texture* (Tablica 3.)

Tablica 3. Preporučene referentne duljine i duljine vrednovanja [5]

REFERENTNA DULJINA	DULJINA VREDNOVANJA	PERIODIČKI PROFIL	NEPERIODIČKI PROFIL	
$lr(\lambda c)$, mm	$ln = 5 \times lr$, mm	RS_m , mm	Rz , μm	Ra , μm
0,08	0,4	> 0,013 do 0,04	do 0,1	do 0,02
0,25	1,25	>0,04 do 0,13	>0,1 do 0,5	>0,02 do 0,1
0,8	4	>0,13 do 0,4	>0,5 do 10	>0,1 do 2
2,5	12,5	>0,4 do 1,3	>10 do 50	>2 do 10
8,0	40	>1,3 do 4	>50	>10

Prilikom izbora *cut-off-a*, nisu korišteni $\lambda c = 0,08$ mm te $\lambda c = 8,0$ mm. Razlog tomu je što kod najmanjeg iznosa *cut-off-a* postoji jako veliki utjecaja šuma ticala, odnosno strukture dobivene prilikom korištenja tog *cut-off-a* su vrlo malene te korištena igla ticala unosi nepravilnosti u snimljeni profil hrapavosti. Najveći *cut-off* iznosa 8,0 mm nije korišten zbog toga što je površina *wafera* po kojem se ticalo kretalo premalena, odnosno potrebna duljina vrednovanja je dulja od promjera *wafera*.

Proizvođač uređaja propisuje brzinu pomicanja ticala te se pomoću te brzine i informacije o duljini površine na kojoj se podatci prikupljaju može izračunati potrebno vrijeme za mjerenje.

Prilikom umjeravanja simulirali su se regularni profili s dvije različite geometrije – slijed regularnih trokutastih i slijed regularnih pravokutnih struktura. Umjeravali su se parametri Ra i Rz , no također će se navesti i vrijednosti parametra RS_m .

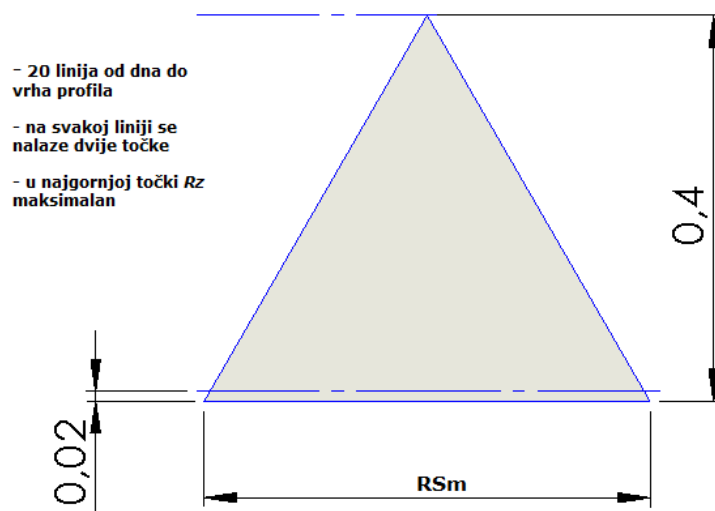
Profili trokutastog i pravokutnog oblika imali su iznose parametra Rz , odnosno ukupnu visinu profila: 0,4 μm , 4 μm i 40 μm .

Iznosi parametara Rz bili su odabrani tako da odgovaraju pripadajućem *cut-off-u*. Primjerice, pri iznosu *cut-off-a* $\lambda c = 0,25$ mm, dozvoljene vrijednosti parametra Rz kreću se između $0,1$ μm i $0,5$ μm , a u ovom radu se koristio iznos $0,4$ μm . Isto je vrijedilo i za preostale visine.

7.2. Profil trokutaste geometrije

7.2.1. Trokutasti profil $Rz = 0,4$ μm

Prvi generiran profil imao je trokutastu geometriju uz nazivnu vrijednost parametra hrapavosti $Rz = 0,4$ μm . Profil se morao izraditi na takav način da bude razumljiv softveru koji omogućuje naredbe pomaka. Piezo pretvornik ima mogućnost uzimanja 64 podatka, odnosno 64 točke, pomoću kojih se navode dimenzije i potrebni pomaci za generiranje profila. U ovom radu koristilo se 40 točaka, odnosno podataka za pomak pieza. Što znači ako je profil trokutaste geometrije, a piezo ima mogućnost zadavanja 40 točaka, ukupna visina se morala dijeliti sa brojem točaka da bi se dobio vertikalni pomak piezo elementa. Ti pomaci kretali su se poput stepenica od početka jednog kraka do vrha trokuta, potom opet natrag do kraja idućeg kraka te su se vraćali u nulu. To znači da se na jednom kraku nalazilo 20 točaka, kao i na drugom. Stoga se ukupna visina jedne periode dijelila s brojem 20 da bi se dobio pomak pieza. U ovom slučaju pomak je iznosio $0,02$ μm . Također je prilikom izrade i generiranja profila u obzir bilo važno uzeti frekvenciju strukture, odnosno vrijeme koje pokazuje koliko svako će softver poslati naredbu do piezo elementa te će se on pomaknuti za $0,02$ μm .



Slika 32. Podjela visine profila na 40 točaka

Poznajući brzinu ticala te ukupni put ticala koji ono prijeđe prilikom mjerenja, može se dobiti vrijeme potrebno ticalu da izvrši mjerenje. RSm , odnosno iznos koraka jedne strukture (periode), može se dobiti ako se ukupni put ticala podijeli sa brojem perioda strukture, što je u ovom slučaju 28. Da bi se dobilo vrijeme potrebno za jednu strukturu, dijeli se korak jedne strukture RSm s brzinom ticala. Potom se vrijeme potrebno za jednu strukturu dijeli sa brojem točaka koje piezo pretvornik generira te se dobiva frekvencija pomaka pieza, odnosno koliko svako se piezo pomakne za određenu visinu.

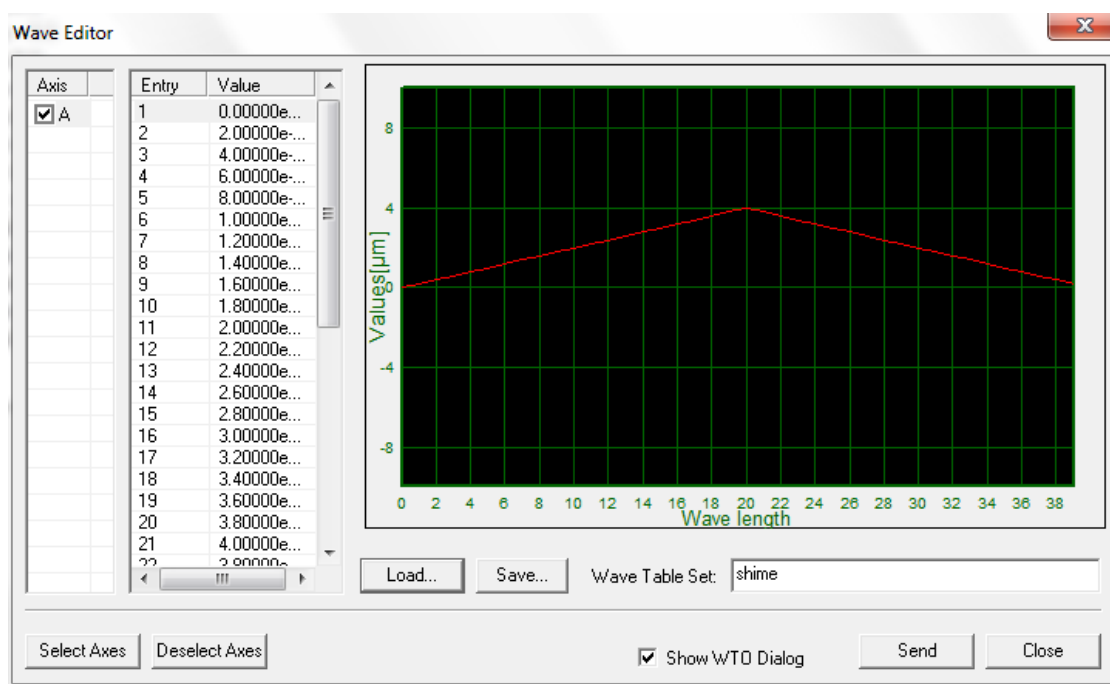
Tablica 4. Podatci vezani za profil $Rz = 0,4 \mu m$

λc (mm)	v_T (mm/s)	l_T (mm)	RSm (mm)
0,25	0,1	1,75	0,0625
t_{RSm} (s)	f (1/s)	N	n
0,625	0,0156	40	28

Gdje je:

- v_T – brzina kojom se ticalo kreće tokom mjerenja
- l_T – put koji ticalo prijeđe tokom mjerenja
- RSm – duljina koraka jedne periode
- t_{RSm} – vrijeme potrebno ticalu da pređe duljinu koraka jedne strukture
- f – frekvencija pomaka, odnosno t_{RSm} podijeljeno sa brojem točaka da bi se dobilo vrijeme potrebno za jedan pomak piezo elementa
- N – broj točaka na koji piezo element dijeli profil
- n – broj perioda strukture

Nakon što su se definirali parametri i *cut-off* vrijednosti, ispisale su se vrijednosti pomaka po točkama. Vrijednosti su se popisivale po točkama u programu Notepad ++. Tako popisane vrijednosti su se potom unosile u WaveTable, odnosno opciju u software-u koja generira izgled profila i određuje koliki će se naponi slati za određene pomake. Na sučelju programa bio je vidljiv iznos napona i njemu proporcionalnog pomaka. Opcija ServoOn morala je biti uključena, dakle radilo se o zatvorenoj petlji. U stupcu *Entry* (pogledati Sliku 33.) mogu se vidjeti redni brojevi točaka. Točaka je ukupno četrdeset te je svakoj pridružena odgovarajuća vrijednost navedena u stupcu *Value*. U naredbi pomaka koju korisnik računala šalje do piezo elementa mora se navesti ukupna visina profila, dakle u ovom slučaju $0,4 \mu m$, te frekvencija pomaka u milisekundama.



Slika 33. Izgled WaveTable-a prilikom generiranja trokutastog profila

Prema podacima navedenim u Tablici 4. ponovljena su mjerenja na 10 simuliranih profila nazivne vrijednosti parametra hrapavosti $R_z = 0,4 \mu\text{m}$, a rezultati su navedeni u Tablici 5.

Tablica 5. Rezultati mjerenja profila $R_z = 0,4 \mu\text{m}$

TROKUTASTI PROFIL		
λ_c (mm)	0,25	
Nazivna vrijednost R_z (μm)	0,4	
Simulirani profil hrapavosti br.	R_a	R_z
1.	0,1	0,46
2.	0,1	0,47
3.	0,1	0,55
4.	0,1	0,46
5.	0,1	0,46
6.	0,1	0,45
7.	0,1	0,48
8.	0,1	0,48
9.	0,1	0,46
10.	0,1	0,46
Aritmetička sredina \bar{x} (μm)	0,1	0,473
Procijenjeno odstupanje s (nm)	0	28,7

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

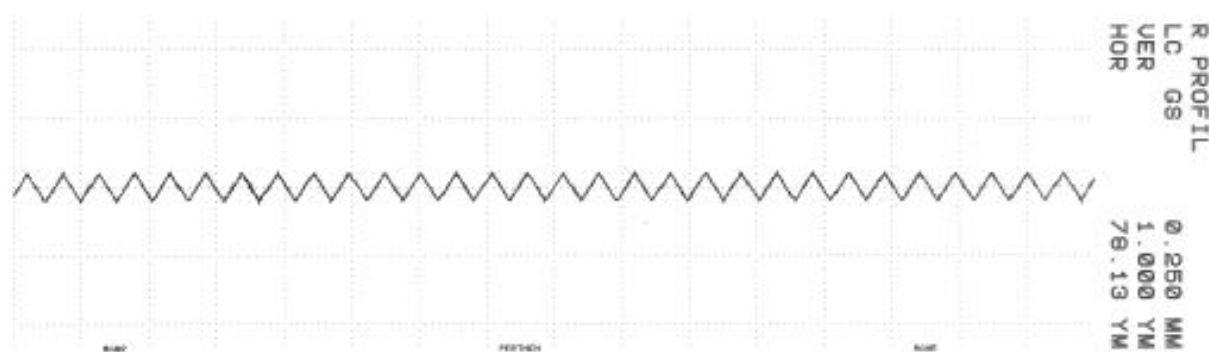
$$\bar{x} = \frac{x_1 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Gdje je:

x_i - rezultati mjerenja

\bar{x} - aritmetička sredina

s – procijenjeno standardno odstupanje



Slika 34. Prikaz simuliranog profila nazivne vrijednosti $R_z = 0,4 \mu\text{m}$

7.2.2. Trokutasti profil $R_z = 4 \mu\text{m}$

Za generiranje trokutaste geometrije profila visine $4 \mu\text{m}$, koristio se isti postupak koji je već objašnjen u poglavlju 7.2.1. Dakle umjesto visine $0,4 \mu\text{m}$ koja se dijelila na dvadeset stepenica, u ovom slučaju se dijelila visina od $4 \mu\text{m}$. Vertikalni pomak jedne stepenice iznosio je $0,2 \mu\text{m}$, te je na dvadesetoj stepenici postizao vrijednosti od $4 \mu\text{m}$. Za svaki pomak frekvencija će iznositi $0,01 \text{ s}$. U Tablici 6. su navedeni podatci vezani za ovaj profil:

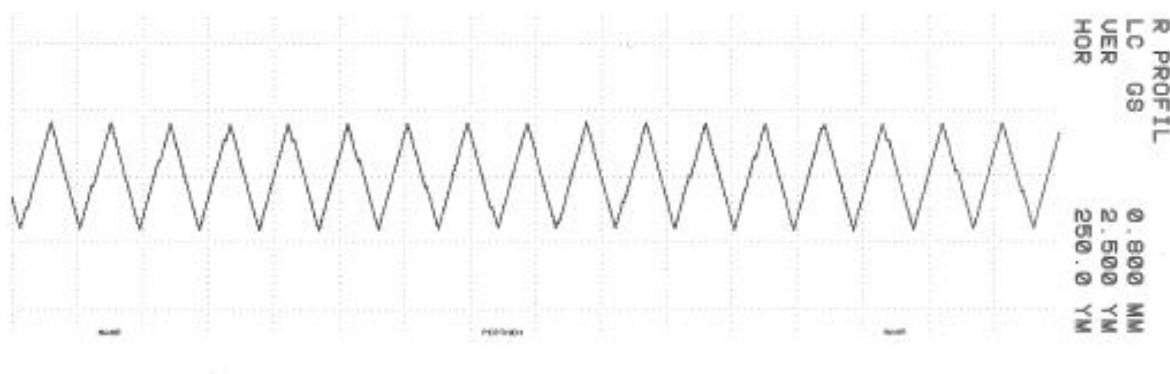
Tablica 6. Podatci vezani za profil $R_z = 4 \mu\text{m}$

λ_c (mm)	v_T (m/s)	l_T (mm)	RS_m (mm)
0,8	0,5	5,6	0,2
t_{RS_m} (s)	f (1/s)	N	n
0,4	0,01	40	28

Prema podacima navedenim u Tablici 6., ponovljena su mjerenja na 10 simuliranih profila nazivne vrijednosti parametra hrapavosti $R_z = 4 \mu\text{m}$, a rezultati su navedeni u Tablici 7.

Tablica 7. Rezultati mjerenja profila $R_z = 4 \mu\text{m}$

TROKUTASTI PROFIL		
λ_c (mm)	0,8	
Nazivna vrijednost R_z (μm)	4	
Simulirani profil hrapavosti br.	R_a	R_z
1.	0,99	4,09
2.	0,99	4,08
3.	1	4,08
4.	1	4,08
5.	0,99	4,07
6.	0,99	4,07
7.	0,99	4,07
8.	0,99	4,07
9.	0,99	4,07
10.	0,99	4,07
Aritmetička sredina \bar{x} (μm)	0,992	4,075
Procijenjeno odstupanje s (nm)	4,22	7,07



Slika 35. Prikaz simuliranog profila nazivne vrijednosti $R_z = 4 \mu\text{m}$

7.2.3. Trokutasti profil $R_z = 40 \mu\text{m}$

Prilikom izrade profila ukupne visine $40 \mu\text{m}$, visina se dijelila na dvadeset točaka. Koristio se postupak opisan u poglavlju 7.2.1. Kod ovog profila se također mjerio i parametar RSm .

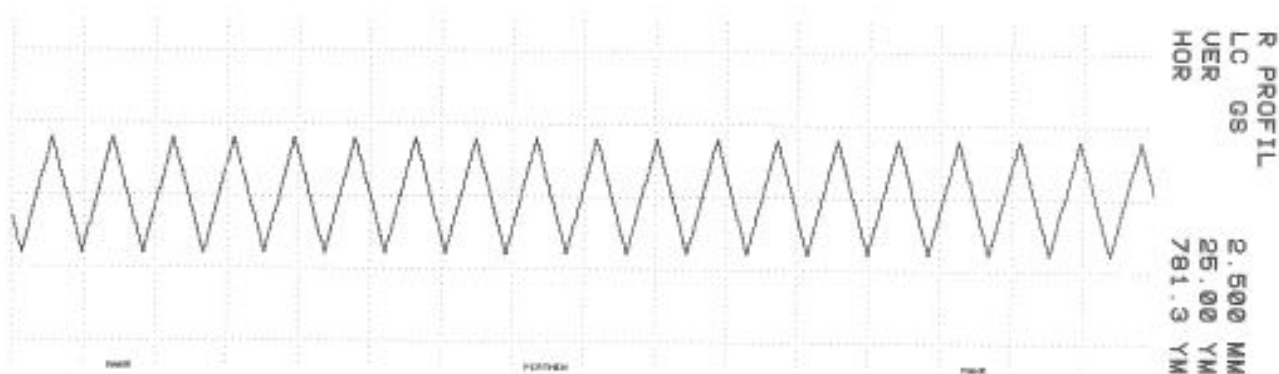
Tablica 8. Podatci vezani za profil $R_z = 40 \mu\text{m}$

λ_c (mm)	v_T (m/s)	l_T (mm)	RSm (mm)
2,5	0,5	17,5	0,625
t_{RSm} (s)	f (1/s)	N	n
1,25	0,03	40	28

Prema podacima navedenim u Tablici 8., ponovljena su mjerenja na 10 simuliranih profila nazivne vrijednosti parametra hrapavosti $R_z = 40 \mu\text{m}$, a rezultati su navedeni u Tablici 9.

Tablica 9. Rezultati mjerenja profila $R_z = 40 \mu\text{m}$

TROKUTASTI PROFIL		
λ_c (mm)	2,5	
Nazivna vrijednost R_z (μm)	40	
Simulirani profil hrapavosti br.	R_a	R_z
1.	9,91	39,95
2.	9,94	40,02
3.	9,98	39,95
4.	9,91	39,99
5.	9,96	40,01
6.	9,93	39,93
7.	9,99	39,96
8.	9,94	39,96
9.	9,91	39,96
10.	9,95	39,99
Aritmetička sredina \bar{x} (μm)	9,942	39,972
Procijenjeno odstupanje s (nm)	28,6	29

Slika 36. Prikaz simuliranog profila nazivne vrijednosti $R_z = 40 \mu\text{m}$

Nakon što su simulirana sva tri profila trokutne geometrije, uspoređeni su dobiveni rezultati parametara Ra i Rz sa referentnim vrijednostima istih.

Odnos parametara Rz i Ra za profile trokutne geometrije je sljedeći:

$$Ra = \frac{Rz}{4}.$$

Prema toj formuli računale se se referente vrijednosti parametra Ra za tri profila trokutne geometrije nazivnih vrijednosti parametra hrapavosti $Rz = 0,4 \mu\text{m}$, $4 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m}$. Izmjerene vrijednosti potom su se usporedile sa referentnim vrijednostima parametara hrapavosti. Razlika Δ računala se prema formuli:

$$\Delta = \text{izmjerena vrijednost} - \text{referentna vrijednost}$$

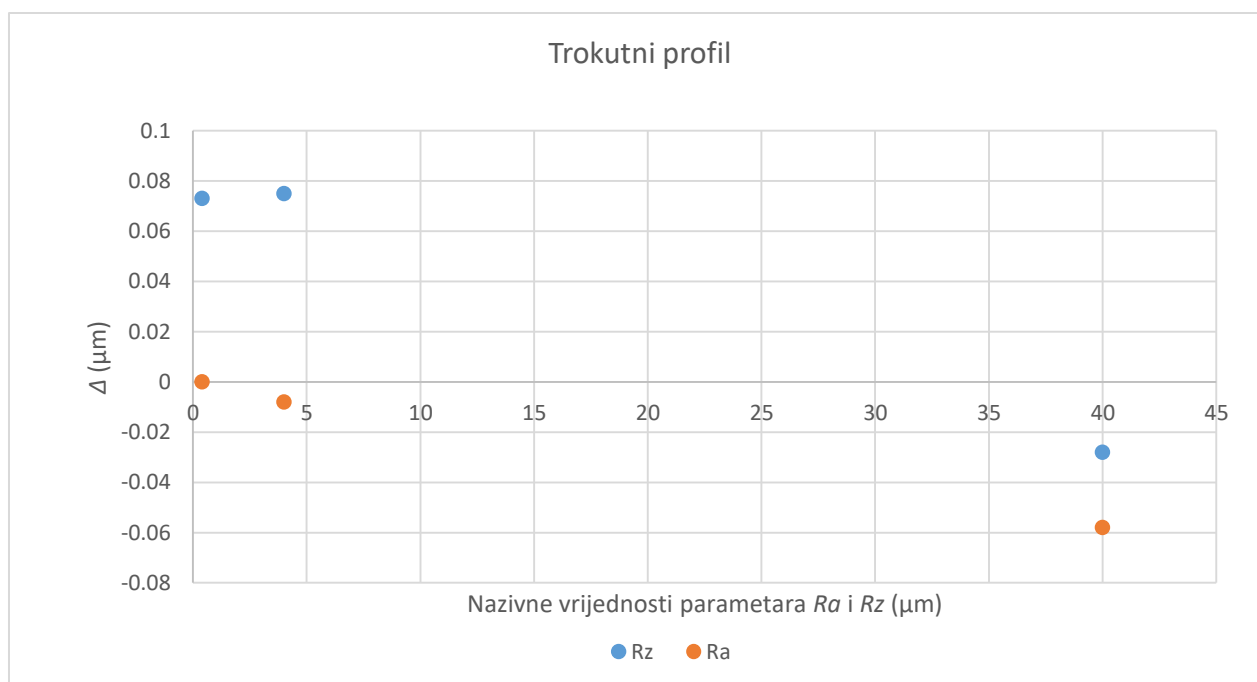
U Tablici 10. navedena su odstupanja aritmetičke sredine \bar{x} izmjerenih vrijednosti parametra Rz od referentne vrijednosti, a u Tablici 11. navedena su odstupanja aritmetičke sredine \bar{x} izmjerenih vrijednosti parametra Ra u odnosu na nazivne (referentne) vrijednosti.

Tablica 10. Vrijednosti parametra Rz profila trokutne geometrije

	Parametar Rz		
Referentna vrijednost (μm)	0,4	4	40
Aritmetička sredina \bar{x} (μm)	0,473	4,075	39,972
Δ (μm)	0,073	0,075	-0,028

Tablica 11. Vrijednosti parametra Ra profila trokutne geometrije

	Parametar Ra		
Referentna vrijednost (μm)	0,1	1	10
Aritmetička sredina \bar{x} (μm)	0,1	0,992	9,942
Δ (μm)	0	-0,008	-0,058



Slika 37. Odstupanja od referentnih vrijednosti parametara hrapavosti Ra i Rz kod trokutnih profila

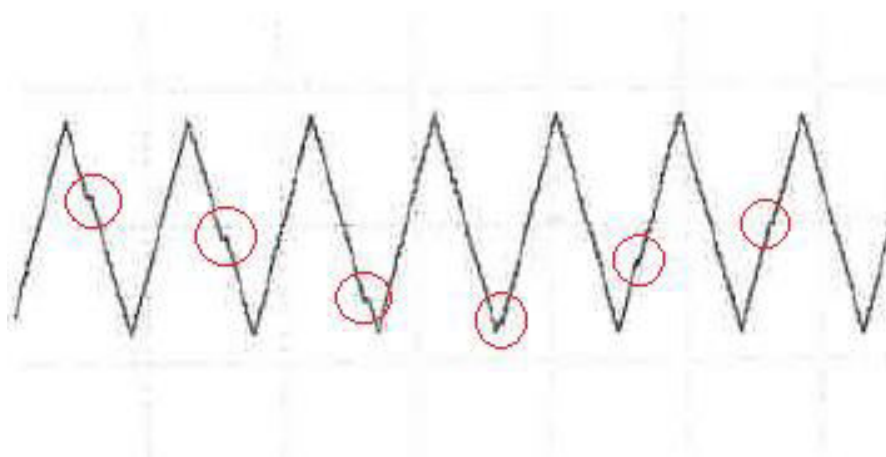
S obzirom na ostvarene rezultate zaključuje se da ne postoji nikakav trend (rasta ili pada) odstupanja dobivenih rezultata od referentnih. Također ne postoji ni linearnost u greškama. Veća odstupanja izmjerene vrijednosti od referentne prisutna su kod manjih struktura.

Prilikom umjeravanja parametara hrapavosti R_z i R_a trokutnog profila nazivne vrijednosti $R_z = 40 \mu\text{m}$, također su se mjerile vrijednosti uzdužnog parametra hrapavosti RS_m . Mjerio se baš na tom profilu zbog toga što je na manjim *cut-off*-ovima uzdužna struktura simuliranog profila bila premalena da bi ju uređaj mogao izmjeriti. U Tablici 12. navedene su izmjerene vrijednosti parametra RS_m na deset simuliranih profila nazivne vrijednosti $R_z = 40 \mu\text{m}$.

Tablica 12 Vrijednosti parametra RSm za simulirani profil $Rz = 40 \mu m$

Nazivna vrijednost parametra Rsm (μm)	625,0
Simulirani profil hrapavosti br.	RSm
1.	657,9
2.	657,9
3.	694,4
4.	657,9
5.	694,4
6.	657,9
7.	694,4
8.	657,9
9.	657,9
10.	657,9
Aritmetička sredina \bar{x} (μm)	668,85
Procijenjeno standardno odstupanje s (μm)	17,631
Δ (μm)	43,85

Iz Tablice 12. se može vidjeti da izmjerene vrijednosti uzdužnog parametra RSm značajno odstupaju od referentne vrijednosti. Prilikom mjerenja uočeno je da se na simuliranim profilima javlja nepravilnost na snimljenom profilu koja znatno utječe na rezultate mjerenja parametra RSm . Nepravilnost se na simuliranim profilima pojavljuje periodično te ima sinusoidalni karakter. Na uvećanom segmentu Slike 35. naznačene su opisane nepravilnosti. Njihov je značaj takav da povećavaju vrijednost širine jedne periode, te time povećavaju i samu vrijednost izmjerenog parametra RSm na simuliranom profilu..

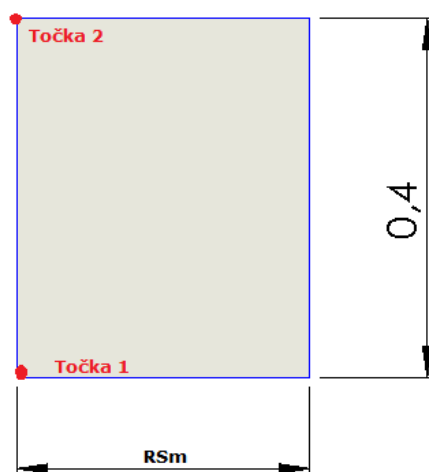


Slika 38. Nagib na simuliranom profilu

7.3. Pravokutni profil

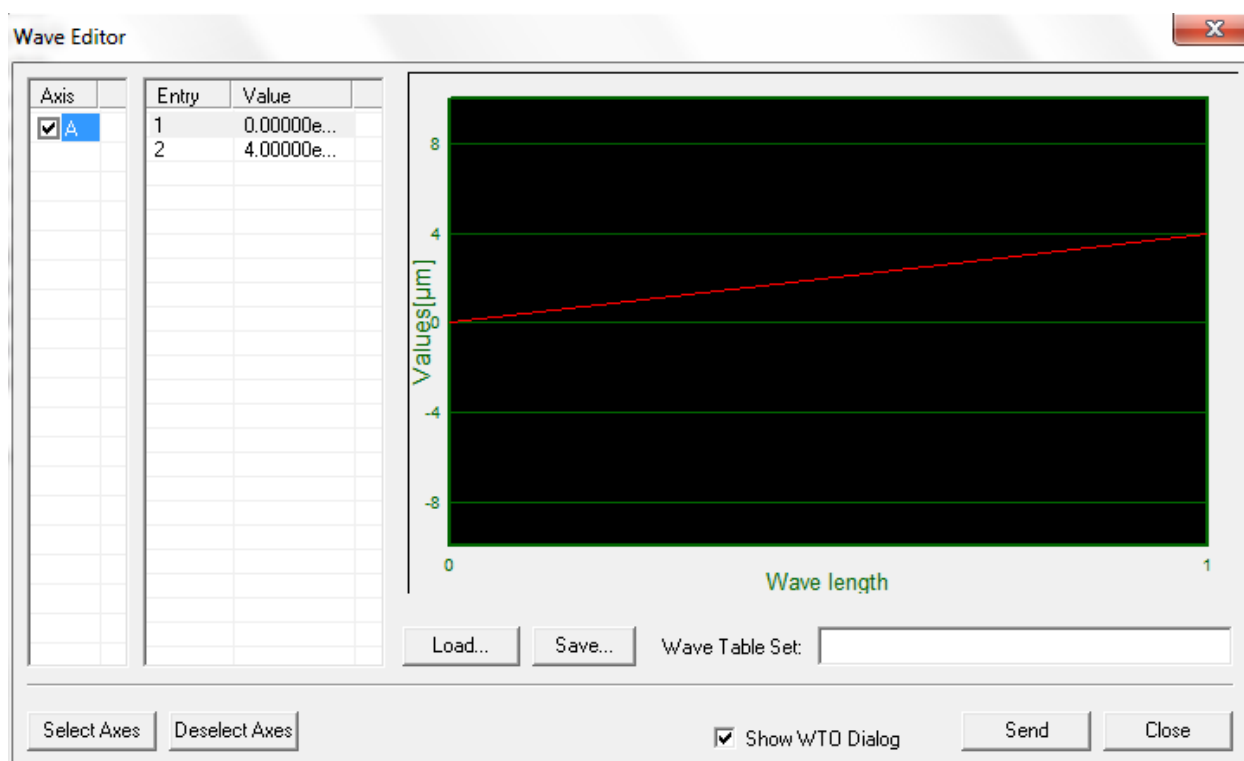
7.3.1. Pravokutni profil $R_z = 0,4 \mu\text{m}$

Kod pravokutnih profila, za razliku od onih trokutaste geometrije, dovoljno je bilo uzeti dvije točke koje su sadržavale podatke o vertikalnim pomacima piezo elementa. Prvoj točki odgovarao je pomak nula, dakle najniža točka profila (dol brazde), dok je drugoj točki odgovarao iznos od $0,4 \mu\text{m}$, odnosno najviša točka na profilu (brijeg brazde). Točke, te njihove pridružene vrijednosti, su se ponovno unosile u Notepad ++ te u se u tom formatu otvarale u WaveEditoru. WaveEditor je generirao profil te potrebne napone koji su se slali do piezo elementa.



Slika 39. Raspodjela visine po točkama kod pravokutnog profila

Na sljedećoj slici može se vidjeti kako izgleda generirani val u WaveEditoru. U stupcu *Entry* nalazi se broj točaka, a u stupcu *Value* njima pridružene vrijednosti.



Slika 40. Generirani pravokutni profil u WaveEditoru

Kod mjerenja pravokutnih profila također su se koristila tri *cut-off-a* koja su se koristila kod trokutnih profila. Umjeravale su se vrijednosti Ra i Rz . U idućoj tablici navedene su vrijednosti parametara prilikom mjerenja. Put ticala odabran je tako da bi se mogle dobiti cjelobrojne vrijednosti parametra RSm .

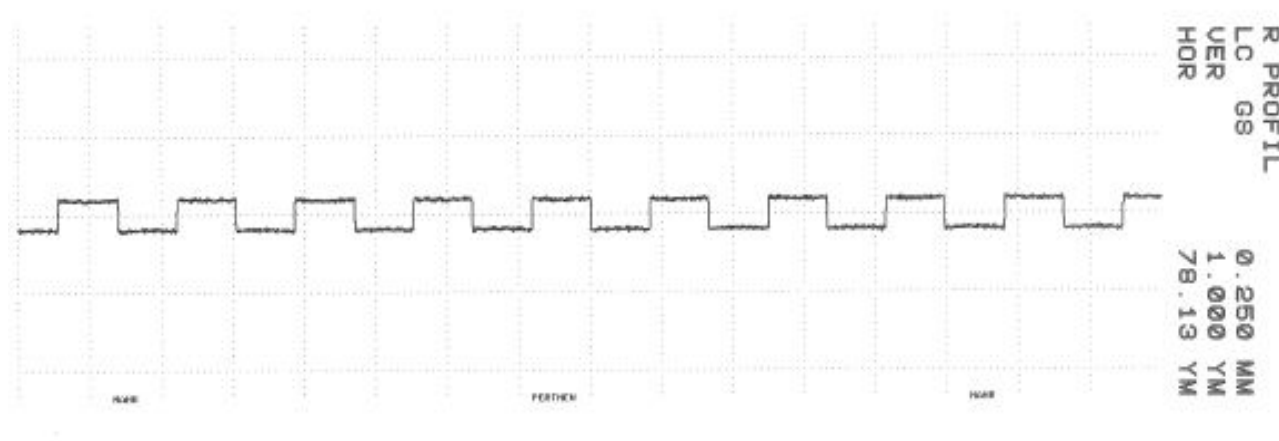
Tablica 13. Podaci vezani za pravokutni profil $Rz = 0,4 \mu m$

λ_c (mm)	v_T (m/s)	l_T (mm)	RSm (mm)
0,25	0,1	3,5	0,125
t_{RSm} (s)	f (1/s)	N	n
1,25	0,625	2	28

Prema podacima navedenim u Tablici 13., ponovljena su mjerenja na 10 simuliranih profila nazivne vrijednosti parametra hrapavosti $R_z = 0,4 \mu\text{m}$, a rezultati su navedeni u Tablici 14.:

Tablica 14. Rezultati mjerenja pravokutnog profila $R_z = 0,4 \mu\text{m}$

PRAVOKUTNI PROFIL		
λ_c (mm)	0,25	
Nazivna vrijednost R_z (μm)	0,4	
Simulirani profil hrapavosti br.	R_a	R_z
1.	0,19	0,53
2.	0,19	0,62
3.	0,19	0,55
4.	0,19	0,46
5.	0,19	0,46
6.	0,19	0,46
7.	0,19	0,46
8.	0,19	0,46
9.	0,19	0,47
10.	0,19	0,47
Aritmetička sredina \bar{x} (μm)	0,19	0,494
Procijenjeno odstupanje s (nm)	0	55



Slika 41. Izgled simuliranog pravokutnog profila $R_z = 0,4 \mu\text{m}$

7.3.2. Pravokutni profil $R_z = 4 \mu\text{m}$

Prilikom generiranja ovog profila bile su potrebne dvije točke; točka jedan koja je iznosila nula, te točka dva koja je iznosila $4 \mu\text{m}$.

Tablica 15. Podatci vezani za pravokutni profil $R_z = 4 \mu\text{m}$

λ_c (mm)	v_T (m/s)	l_T (mm)	RS_m (mm)
0,8	0,5	11,2	0,4
t_{RS_m} (s)	f (1/s)	N	n
0,8	0,4	2	28

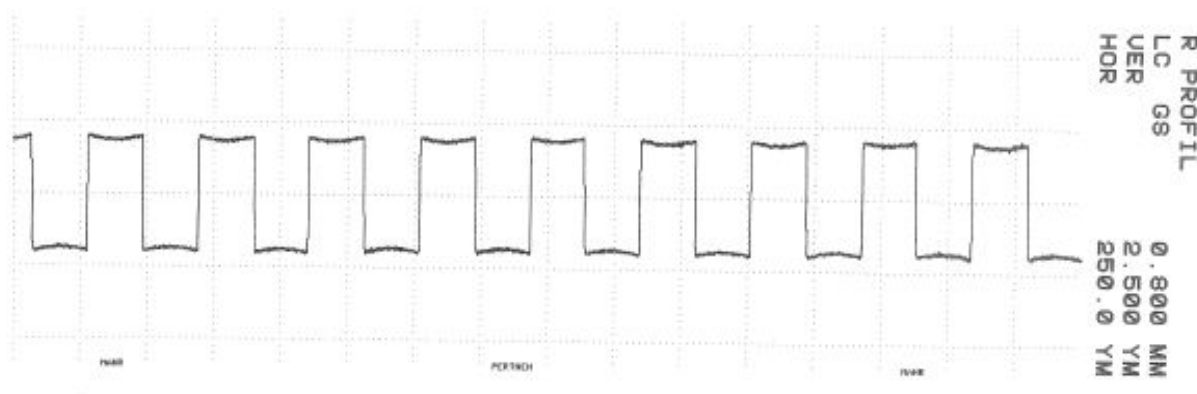
Rezultati mjerenja ponovljenih na 10 simuliranih profila pravokutne geometrije nazivne vrijednosti parametra $R_z = 4 \mu\text{m}$, navedeni su u Tablici 16.

Tablica

16.

PRAVOKUTNI PROFIL		
λ_c (mm)	0,8	
Nazivna vrijednost R_z (μm)	4	
Simulirani profil hrapavosti br.	R_a	R_z
1.	1,88	4,12
2.	1,88	4,15
3.	1,88	4,11
4.	1,88	4,1
5.	1,88	4,09
6.	1,88	4,1
7.	1,88	4,11
8.	1,88	4,1
9.	1,88	4,09
10.	1,88	4,1
Aritmetička sredina \bar{x} (μm)	1,88	4,107
Procijenjeno odstupanje s (nm)	0	17,7

Rezultati mjerenja pravokutnog profila $R_z = 4 \mu\text{m}$

Slika 42. Prikaz simuliranog pravokutnog profila $R_z = 4 \mu\text{m}$

7.3.3. Pravokutni profil $R_z = 40 \mu\text{m}$

Profil se generirao pomoću dvije točke. Prva točka imala je vrijednost vrijednosti 0 te druga točka vrijednost $40 \mu\text{m}$.

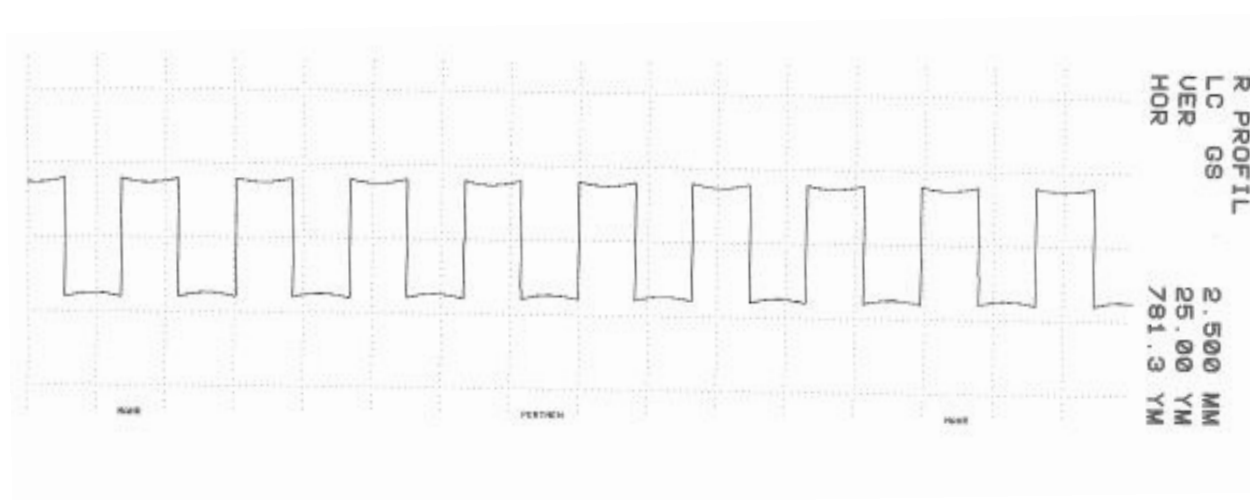
Tablica 17. Podatci vezani za pravokutni profil $R_z = 40 \mu\text{m}$

λ_c (mm)	v_T (m/s)	l_T (mm)	RS_m (mm)
2,5	0,5	35	1,25
t_{RS_m} (s)	f (1/s)	N	n
2,5	1,25	2	28

Rezultati mjerenja ponovljenih na 10 simuliranih profila pravokutne geometrije nazivne vrijednosti parametra $R_z = 40 \mu\text{m}$, navedeni su u Tablici 18.

Tablica 18. Rezultati mjerenja pravokutnog profila $R_z = 40 \mu\text{m}$

PRAVOKUTNI PROFIL		
λ_c (mm)	2,5	
Nazivna vrijednost R_z (μm)	40	
Simulirani profil hrapavosti br.	R_a	R_z
1.	18,97	39,99
2.	18,97	39,98
3.	18,97	40
4.	18,97	40,02
5.	18,97	39,97
6.	18,97	40
7.	19	40,09
8.	18,96	39,99
9.	18,99	39,97
10.	18,97	39,92
Aritmetička sredina \bar{x} (μm)	18,974	39,993
Procijenjeno odstupanje s (nm)	11,7	43,2

Slika 43. Prikaz pravokutnog simuliranog profila $R_z = 40 \mu\text{m}$

Nakon što su dobiveni rezultati umjeravanja parametara hrapavosti Ra i Rz triju simuliranih profila pravokutne geometrije, uspoređene su dobivene vrijednosti sa referentnim vrijednostima parametara.

U Tablici 19. i Tablici 20. navedene su aritmetičke sredine izmjerenih vrijednosti i referentne vrijednosti parametara hrapavosti Ra i Rz pravokutnih profila referentne vrijednosti parametara hrapavosti $Rz = 0,4 \mu\text{m}$, $4 \mu\text{m}$ i $40 \mu\text{m}$. Kod profila pravokutne geometrije, referentna vrijednost parametara Ra iznosi jednu polovinu vrijednosti parametara Rz . Razlika Δ dobila se oduzimanjem referentne vrijednosti parametara od aritmetičke sredine izmjerenih vrijednosti.

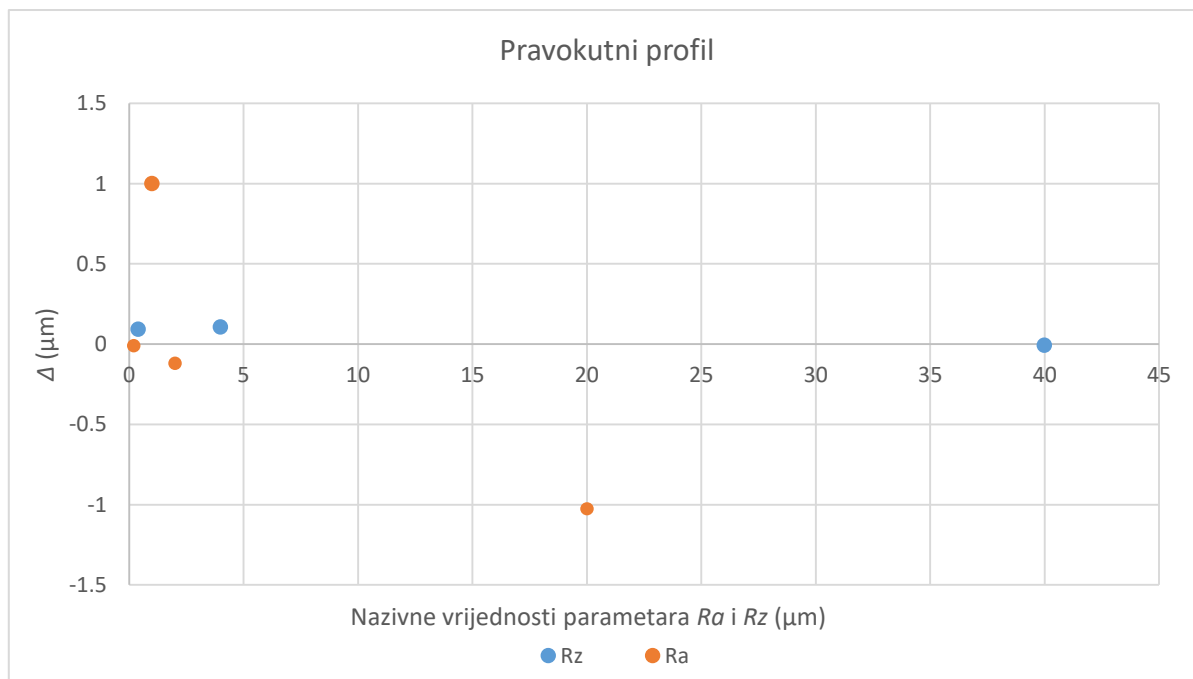
Tablica 19. Vrijednosti parametara Rz profila pravokutne geometrije

	Parametar Rz		
Referentna vrijednost (μm)	0,4	4	40
Aritmetička sredina \bar{x} (μm)	0,494	4,107	39,993
Δ (μm)	0,094	0,107	-0,007

Tablica 20. Vrijednosti parametara Ra profila pravokutne geometrije

	Parametar Ra		
Referentna vrijednost (μm)	0,2	2	20
Aritmetička sredina \bar{x} (μm)	0,19	1,88	18,974
Δ (μm)	-0,01	-0,12	-1,026

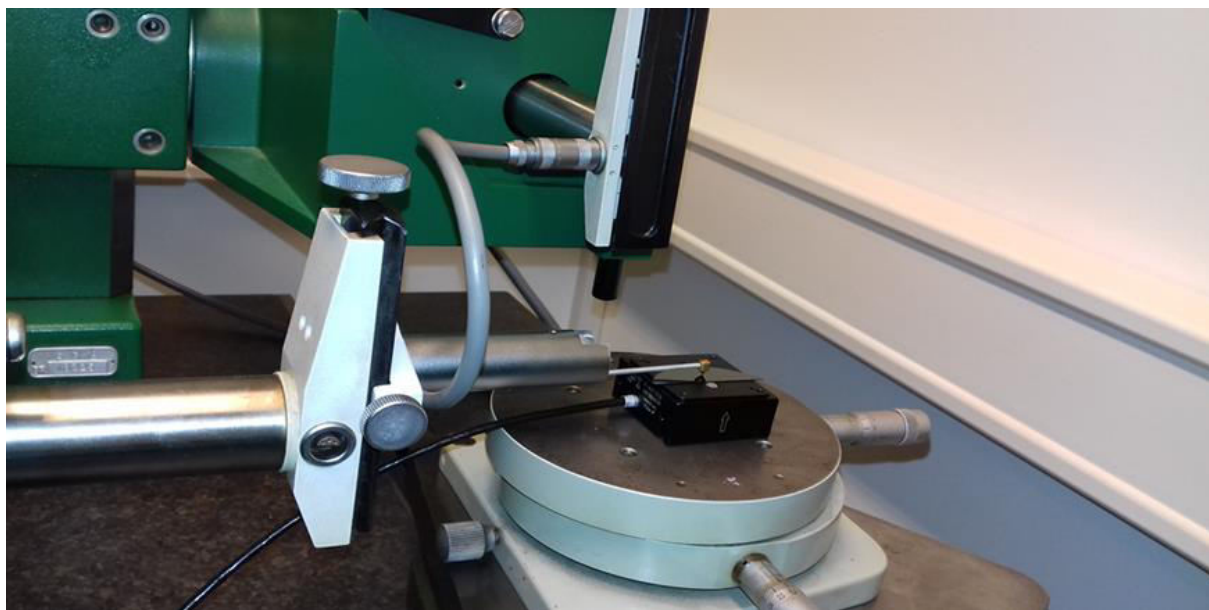
Odstupanja od referentnih vrijednosti se ne kreću linearno te se ne može uočiti nikakav trend po kojem bi odstupanja rasla ili padala. Veća odstupanja od referentnih vrijednosti izmjerena su kod manjih struktura simuliranih profila.



Slika 44. Odstupanja od referentnih vrijednosti parametara Ra i Rz kod pravokutnih profila

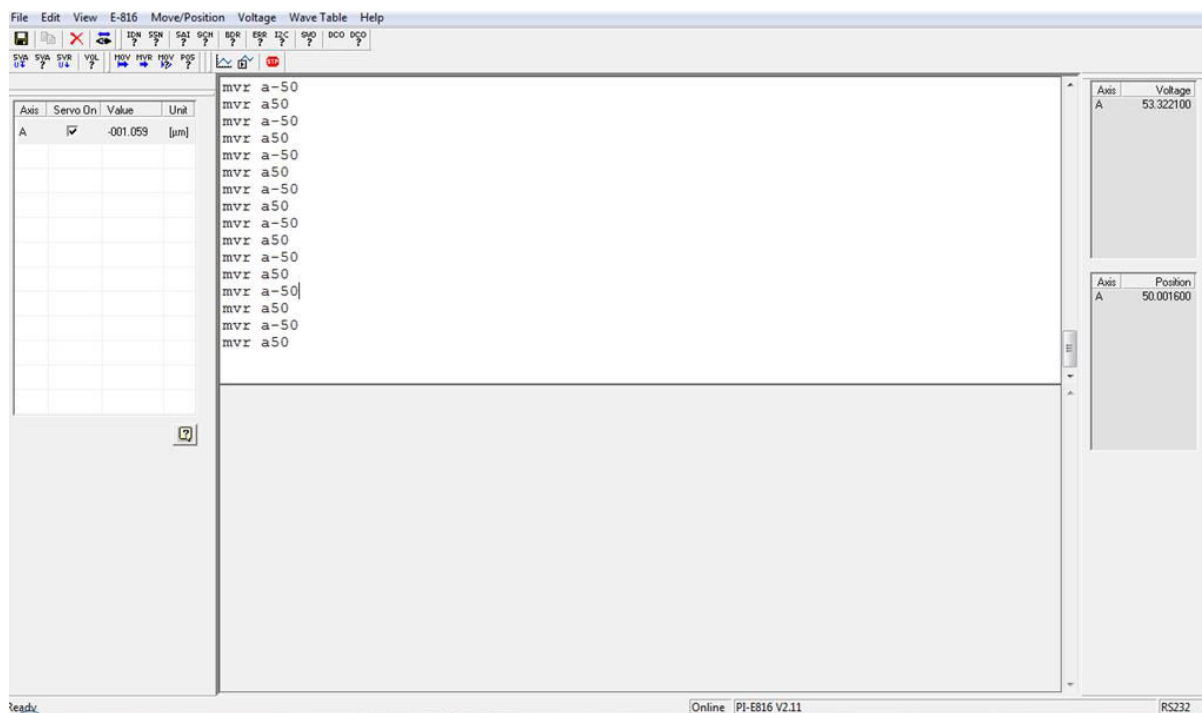
7.4. Statički način rada

U statičkom načinu rada umjeravala se vertikalna komponenta mjernog uređaja. Statičko mjerenje podrazumijeva da su otklonjeni utjecaji brzine ticala, lateralnog pomaka i frekvencije. Ticalo miruje, a piezo element se u jednom trenutku pomiče u smjeru z osi te tako simulira stepenicu određene visine (dubine). To je postignuto tako da je ticalo postavljeno na drugu konzolu te je kabelom povezano s konzolom na kojoj se početno nalazilo. Rezultat toga bio je da ticalo na novoj konzoli miruje iznad piezo elementa, dok je konzola bez ticala, prelazila zadani put. Na ekranu umjeravanog elektroničko-mehaničkog uređaja s ticalom, promatrao se put koji konzola prelazi te se u određenom trenutku, primjerice na polovici zadanog puta, preko računala poslao signal do piezo elementa koji se potom pomicao za željenu vrijednost. Ticalo pričvršćeno na novu konzolu bilježilo je pomak pieza te su se podatci ticala i putujuće konzole istovremeno slali na obradu.



Slika 45. Izgled mjernog uređaja pri umjeravanju vertikalne komponente

U statičkom načinu rada mjerio se parametar Pt (ukupna visina profila). Odabrano je pet nazivnih vrijednosti parametra Pt : 1 μm , 5 μm , 10 μm , 25 μm , 50 μm . Prilikom generiranja pomaka piezo elementa (relativni pomak će biti jednake vrijednosti kao Pt) nije bilo potrebno koristiti WaveEditor, već se relativni pomak piezo stagea unosio izravno u prozor za unos naredbi. Kontroler je potom pretvarao relativni pomak u napon koji je potreban piezo elementu. Uključena je opcija ServoOn što znači da se radilo o zatvorenoj petlji.



Slika 46. Način unošenja pomaka pri umjeravanju vertikalne komponente

U idućoj tablici navedeni su rezultati mjerenja provedenih na simuliranim profilima nazivnih vrijednosti parametra P_t : 1 μm , 5 μm , 10 μm , 25 μm , 50 μm . Svaki profil određene nazivne vrijednosti parametra P_t simuliran je deset puta.

Tablica 21. Rezultat umjeravanja vertikalne komponente

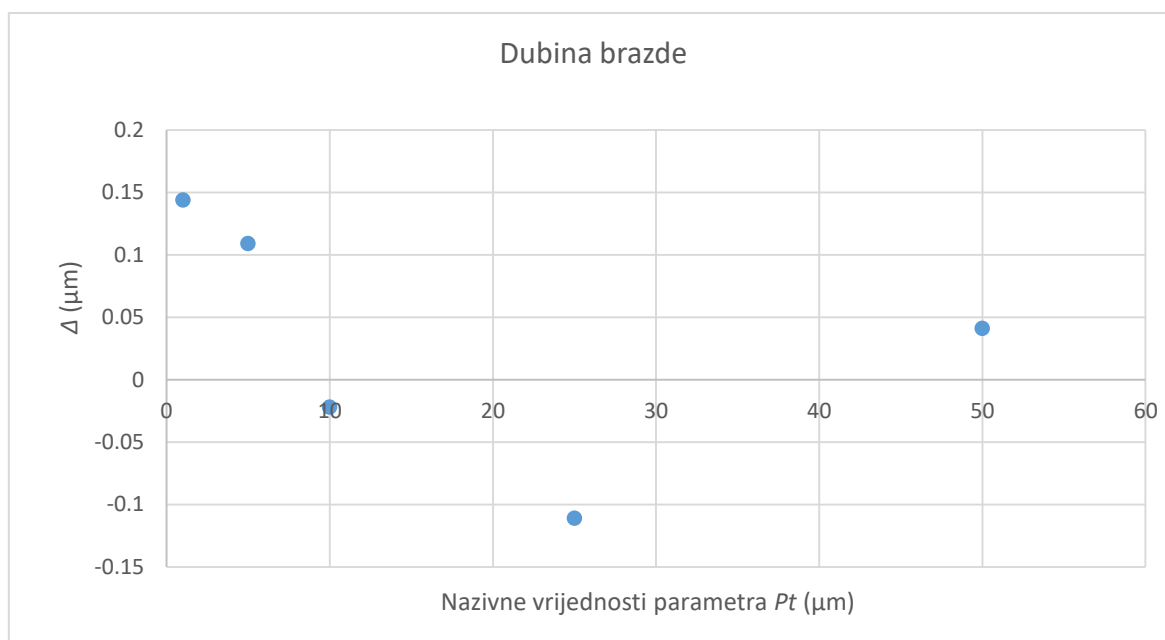
DUBINA BRAZDE					
Nazivna vrijednost P_t (μm)	1	5	10	25	50
Simulirani profil hrapavosti br.	P_t	P_t	P_t	P_t	P_t
1.	1,21	5,15	9,93	24,92	50,03
2.	1,12	5,1	9,95	24,93	49,98
3.	1,21	5,11	10,09	24,89	50,03
4.	1,09	5,2	9,95	24,86	50,06
5.	1,14	5,07	9,99	24,84	50,08
6.	1,11	5,05	9,99	24,86	50,13
7.	1,15	5,09	9,93	24,9	50,1
8.	1,15	5,11	9,96	24,92	50,08
9.	1,18	5,12	10	24,91	49,96
10.	1,08	5,09	9,99	24,86	49,96
Aritmetička sredina \bar{x} (μm)	1,144	5,109	9,978	24,889	50,041
Procijenjeno odstupanje s (μm)	0,04575	0,042	0,0471	0,0318	0,0595

Nakon što su dobiveni rezultati umjeravanja parametra P_t , usporedili su se sa zadanim referentnim vrijednostima. U Tablici 22. navedene su referentne vrijednosti i aritmetička sredina te razlika aritmetičke sredine i referentne vrijednosti simuliranih profila.

Tablica 22. Vrijednosti parametra P_t

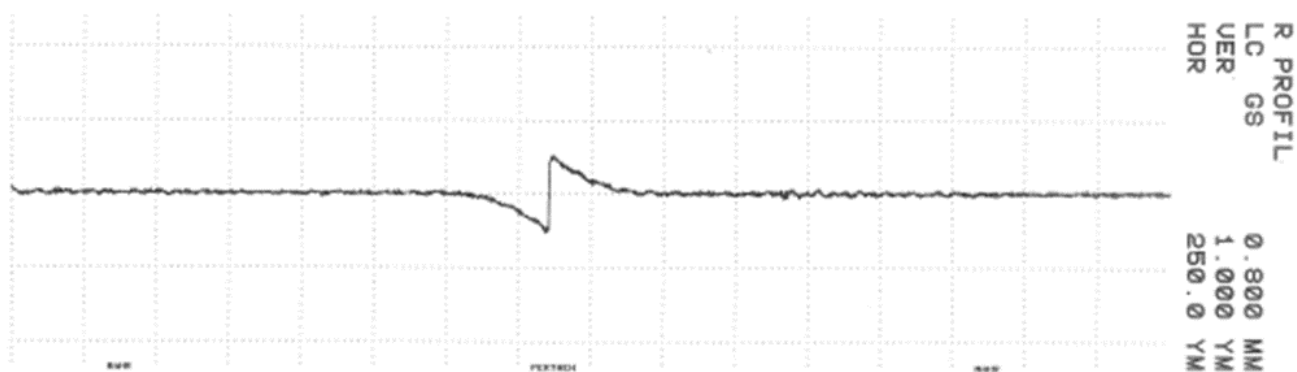
	Parametar P_t				
Referentna vrijednost (μm)	1	5	10	25	50
Aritmetička sredina \bar{x} (μm)	1,144	5,109	9,978	24,889	50,041
Δ (μm)	0,144	0,109	-0,022	-0,111	0,041

S obzirom na ostvarene rezultate može se zaključiti da se odstupanja od referentne vrijednosti ne kreću linearno te da ne postoji uzlazni ili silazni trend rasta odstupanja. Kod manjih struktura primijećeno je veće odstupanje izmjerene referentne i referentne vrijednosti.

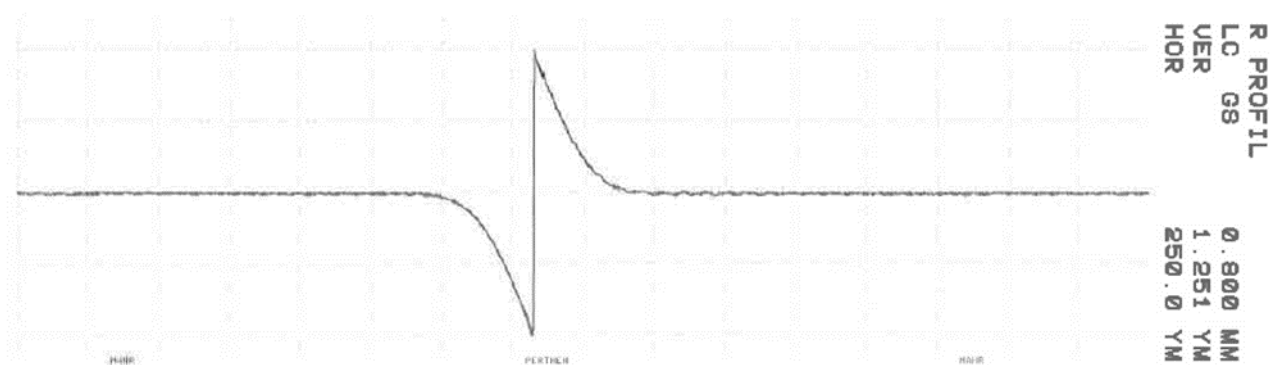


Slika 47. Odstupanja od referentnih vrijednosti parametra P_t kod simuliranih profila

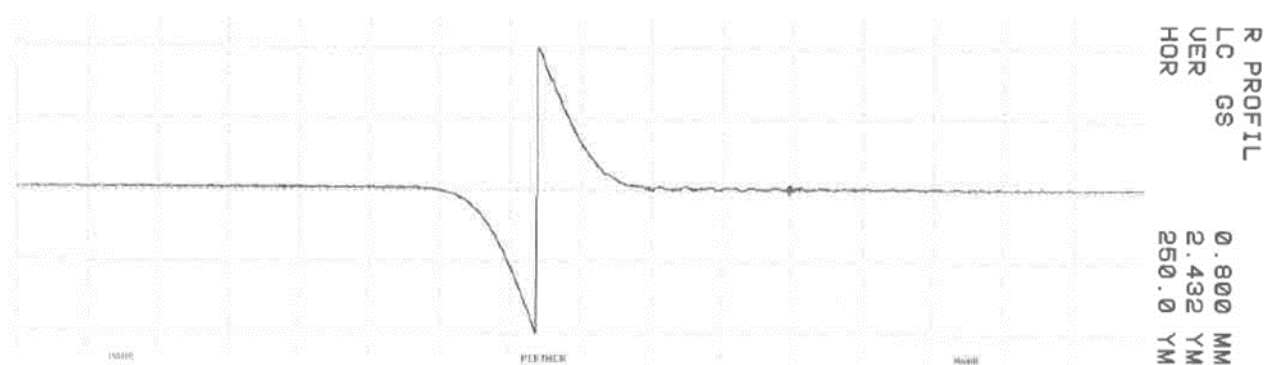
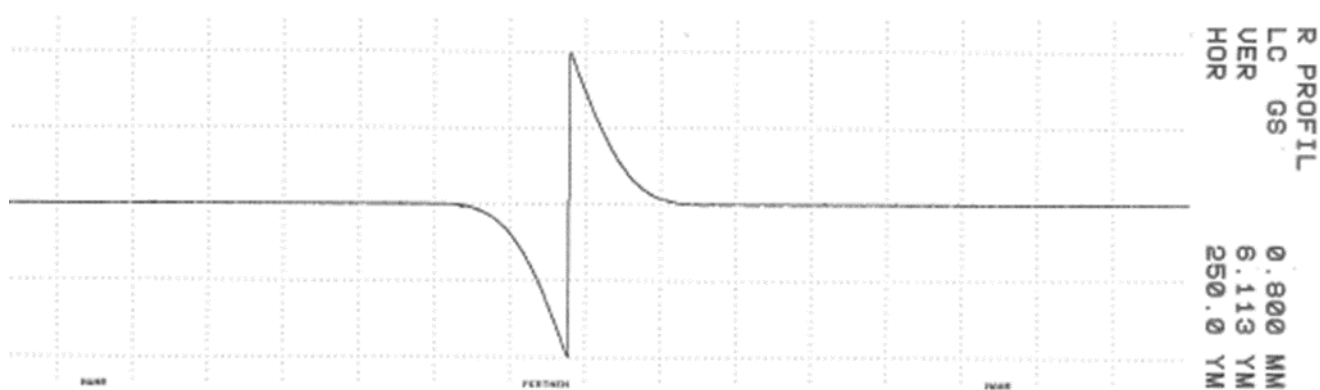
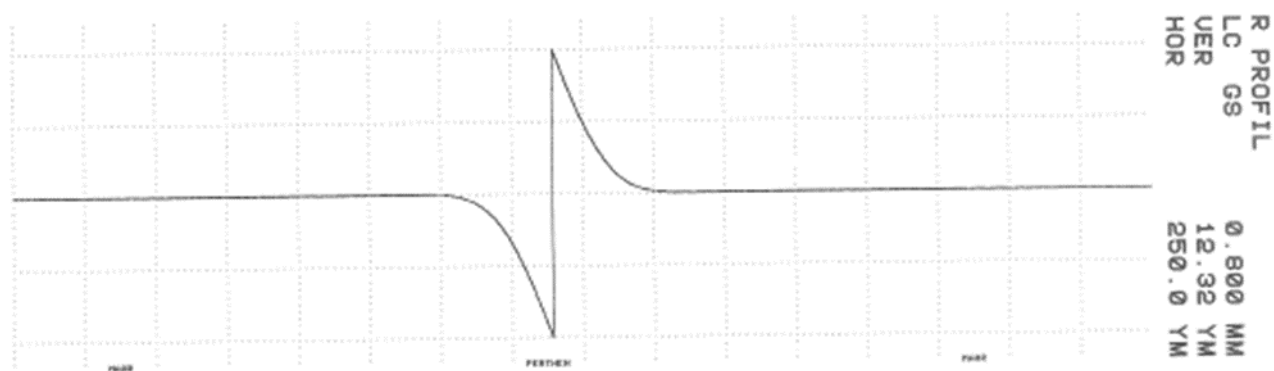
Na idućim slikama prikazani su simulirani profili:



Slika 48. Simulirani profil $P_t = 1 \mu\text{m}$



Slika 49. Simulirani profil $P_t = 5 \mu\text{m}$

Slika 50. Simulirani profil $Pt = 10 \mu\text{m}$ Slika 51. Simulirani profil $Pt = 25 \mu\text{m}$ Slika 52. Simulirani profil $Pt = 50 \mu\text{m}$

Nerijetko se u području ispitivanja hrapavosti površina utvrđena odstupanja iskazuju kao relativna odstupanja. U Tablici 23. prikazane su izračunate vrijednosti odstupanja (Δ) iskazane relativno u odnosu na nazivne vrijednosti mjerenih parametara hrapavosti.

Relativna odstupanja računala su se prema formuli:

$$\delta = \frac{\Delta (Rz, Ra, Pt)}{\text{vrijednost referentnog parametra (Rz, Ra, Pt)}} \times 100\%$$

Tablica 23. Relativna odstupanja od referentnih parametara hrapavosti kod simuliranih profila

Trokutni profil br.	Referentna vrijednost Rz (μm)	Referentna vrijednost Ra (μm)	Δ (Rz) (μm)	Δ (Ra) (μm)	$ \delta $ (Rz) %	$ \delta $ (Ra) %
1.	0,4	0,1	0,073	0	18,3	0
2.	4	1	0,075	-0,008	1,9	0,8
3.	40	10	-0,028	-0,058	0,1	0,6
Pravokutni profil br.	Referentna vrijednost Rz (μm)	Referentna vrijednost Ra (μm)	Δ (Rz) (μm)	Δ (Ra) (μm)	$ \delta $ (Rz) %	$ \delta $ (Ra) %
1.	0,4	0,2	0,094	-0,01	23,5	5
2.	4	2	0,107	-0,12	2,7	6
3.	40	20	-0,007	-1,026	0	5,1
Dubina brazde profil br.	Referentna vrijednost Pt (μm)	Δ (μm)	$ \delta $ %			
1.	1	0,144	14,4			
2.	5	0,109	2,2			
3.	10	-0,022	0,2			
4.	25	-0,111	0,4			
5.	50	0,041	0,1			

Utvrđeno je da je korišteni mjerni sustav nije primjenjiv za umjeravanje uređaja korištenjem simuliranih struktura s vertikalnim komponentama $\leq 1 \mu\text{m}$. Relativna odstupanja od nazivnih vrijednosti za ostale simulirane strukture nisu veća od 6 %.

8. ZAKLJUČAK

Proširenjem etalonske baze pomoću piezo elementa, mogli bi se potencijalno premostiti nedostaci i ograničenja postojeće etalonske baze za umjeravanje elektroničko–mehaničkih uređaja s ticalom. Pomoću precizne regulacije vertikalnih pomaka piezo elementa, moguće je simulirati velik broj profila različite geometrije i valnih duljina pomoću kojih bi se moglo šire umjeriti mjerno područje elektroničko-mehaničkog uređaja s ticalom. U obzir se treba uzeti da laboratoriji raspolažu samo s određenim brojem postojećih etalona te su ograničeni mjernim značajkama tih etalona prilikom umjeravanja. Prijedlog proširenja te nedostaci i ograničenja postojećih etalona prepoznati su i na razini nacionalnih laboratorija te se ulažu znatni naponi da se proširi etalonska baza korištenjem piezo elementa.

Laboratorij za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu raspolaže sa piezo elementom, upravljačkom jedinicom i softverom za upravljanje preciznim pomacima piezo elementa. Prilikom umjeravanja električko-mehaničkog uređaja s ticalom pomoću piezo elementa, uočeno je da upravljačka jedinica ne upravlja dovoljno stabilno preciznim pomacima piezo elementa što je prouzrokovalo određene periodičke nepravilnosti na simuliranim profilima. Periodičke nepravilnosti utjecale su na rezultate mjerenja uzdužnog parametra hrapavosti RS_m . Nadalje, u radu se koristilo ticalo s vanjskim vođenjem radijusa $r = 10 \mu\text{m}$, koje nema zadovoljavajuću rezoluciju potrebnu za mjerenje parametara hrapavosti na strukturama s vertikalnim komponentama veličine ispod $1 \mu\text{m}$. Dodatno, korišteno ticalo unosi značajan šum na snimljenom profilu koji je posebice dominantan pri mjerenju malih struktura.

Relativna odstupanja od nazivnih vrijednosti parametara hrapavosti na simuliranim strukturama s vertikalnim komponentama većim od $1 \mu\text{m}$ ne prelaze 6 % što se može smatrati dobrom motivacijom na nastavak istraživanja u cilju smanjena ostvarenih relativnih odstupanja.

Potencijalan prostor za smanjene utvrđenih relativnih odstupanja moguć je korištenjem ticala manjeg radijusa igle kojim je moguće osigurati bolju rezoluciju te koje ne unosi značajan šum na snimljeni profil. Dodatno, potrebno je osigurati mogućnost generiranja većeg broja točaka koje će detaljnije definirati simulirane mjerne strukture.

IZVORI:

- [1] Runje, B. 2014. *Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [2] Olympus. *Roughness Terminology*, <https://www.olympus-ims.com/en/knowledge/metrology/roughness/dictionary/> (datum preuzimanja: 5. 12. 2017.)
- [3] Olympus. *Roughness (2D) parameter*, https://www.olympus-ims.com/en/knowledge/metrology/roughness/2d_parameter/ (datum preuzimanja: 5. 12. 2017.)
- [4] Leach, R. 2014. *The measurement of surface texture using Stylus instruments*, University of Nottingham
- [5] Rudan, D. 2013. *Diplomski rad: Umjeravanje vertikalne komponente elektroničko-mehaničkog uređaja s ticalom*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [6] ISO 5436-1:2000. Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method; Measurement standards - Part 1: Material measures
- [7] Physik Instrumente (PI). 2007. *PZ166E User Manual: E-625.CR LVPZT Controller/Amplifier*
- [8] Physik Instrumente (PI). *P-620.Z – P-622.Z PIHera Precision Z-Stage*, <https://www.physikinstrumente.com/en/products/linear-stages-and-actuators/piezo-stages/p-620z-p-622z-pihera-precision-z-stage-202501/> (datum preuzimanja: 1. 2. 2018.)
- [9] Physik Instrumente (PI). 2007. *PZ146E Software Manual PZTControl for E-816*
- [10] Vatansever D., Siores E., Shah T. 2012. *Alternative Resources for Renewable Energy: Piezoelectric and Photovoltaic Smart Structures*, University of Bolton, Institute for Materials Research and Innovation, United Kingdom